

THESES

présentées

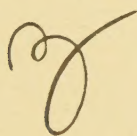
à la Faculté des Sciences de l'Université de Nantes

pour obtenir

le GRADE de DOCTEUR-INGENIEUR

par

J.P. BAUDOIN



1^{ère} THESE : Contribution à l'étude du figeage des contraintes

2^{ème} THESE : Propositions données par la Faculté

Soutenues le 17 juin 1968 devant la Commission d'Examen

M. TARDY Président

Melle OFFRET }
M. RAVILLY } Examinateurs



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555419_0023

THESES

présentées

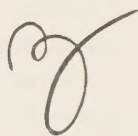
à la Faculté des Sciences de l'Université de Nantes

pour obtenir

le GRADE de DOCTEUR-INGENIEUR

par

J.P. BAUDOIN



1^{ère} THESE : Contribution à l'étude du figeage des contraintes

2^{ème} THESE : Propositions données par la Faculté

Soutenues le 17 juin 1968 devant la Commission d'Examen

M. TARDY	Président
Melle OFFRET	} Examineurs
M. RAVILLY	

THESES

OF THE
UNIVERSITY OF LEIDEN

IN THE
FACULTY OF THE LETTERS



PRINTED BY J. VAN DIJK, LEIDEN

1874

NO. 1

THESE

DE

1874

FACULTÉ DES SCIENCES

Doyen
Assesseur
Professeurs

M. DUNOYER de SEGONZAC	Chimie
M. SELLIER	Zoologie
M. PAUC	Mathématiques
M. RAVILLY (E.N.S.M.)	Mécanique
M. RAFFIN	Mécanique rationnelle
M. GARRIGUES	Biologie végétale
M. BRILLOUET	Analyse numérique
M. GRAFF	Chimie
M. VIVIER (E.N.S.M.)	Mathématiques appliquées
M. COLLET	Physique
M. BOULLLOUD (C.S.U.)	Physique
Mlle DEBRAUX	Botanique
M. PETRESCO	Mathématiques
M. PIERI	Biologie animale
M. WOJTKOWIAK	Chimie
M. AVIGNON	Physique
M. MOUTON	Physique
M. TARDY (E.N.S.M.)	Mécanique

Professeurs sans chaire

M. GOBIN (E.N.S.M.)	Chimie
M. CAVET	Sciences de la Terre
M. OTTMANN	Sciences de la Terre
M. MEZENECV (E.N.S.M.)	Physique
M. MOLINARO	Mathématiques
M. DUPONT	Biologie végétale
M. ROUXEL	Chimie
M. MINN	Physique
M. QUINIOU	Chimie
Mlle OFFRET (E.N.S.M.)	Physique

Maîtres de Conférences

M. FORESTIER	Sciences de la Terre
M. LASKAR	Physique
M. SAUDRAY	Biologie animale
M. MARTIN	Chimie
M. GOUREAUX	Physique
M. LE DOUARIN Georges	Biologie végétale
M. AMOURIQ	Psychophysiologie
Mlle ASTIE (C.S.U.)	Botanique
M. LAMEAU (E.N.S.M.)	Mathématiques
Mme LE DOUARIN Nicole	Biologie végétale
M. TOURNOUX	Chimie minérale
M. GUEVEL (E.N.S.M.)	Mathématiques
M. GOUIN (C.S.U.)	Chimie
M. POINTEAU (E.N.S.M.)	Chimie
M. SULMONT (E.N.S.M.)	Mathématiques
M. BARDON	Physique
M. LONCKE	Physique
M. LEBRUN	Biologie animale
M. CORBEL (C.S.U.)	Biologie animale
M. JONARD	Biologie végétale

M. IBISCH Maître de Conférences associé

M. FOUQUES Mathématiques

M. PAILLET Attaché Principal

Secrétaire de la Faculté

A mon Maître, D. TARDY,

A mes parents,

A ma femme

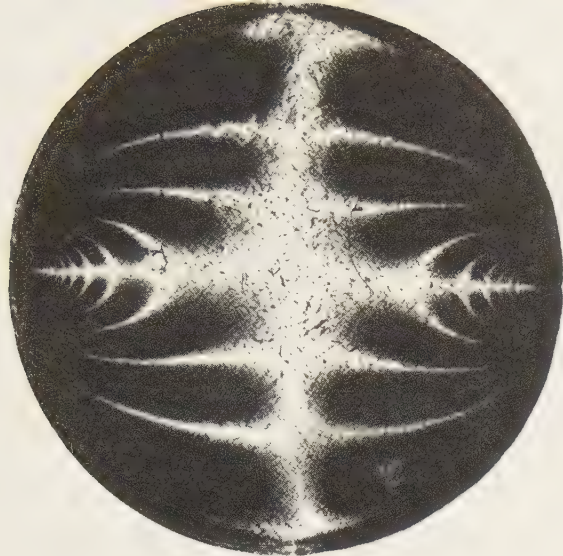
Ce travail a été effectué au Laboratoire de Résistance des Matériaux de l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique de Nantes, sous la haute direction de Monsieur le Professeur D. TARDY, Directeur du Laboratoire.

Je tiens à exprimer ici ma plus profonde gratitude et à adresser mes remerciements à Monsieur le Professeur D. TARDY, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique, qui a bien voulu accepter la Présidence de mon Jury.

Je remercie également Mademoiselle OFFRET et Monsieur RAVILLY, Professeurs, membres de la commission d'examen.

J'adresse ma plus profonde reconnaissance à Monsieur GUILLO, Ingénieur à la Société Nationale d'Etudes et de Construction de Moteurs d'Avions, pour les renseignements qu'il a bien voulu me communiquer en photoélasticimétrie.

Et je ne voudrais pas oublier dans ces remerciements, tous les techniciens, élèves et chercheurs qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de cette étude.



CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CONTRAINTES
PAR LA METHODE DE FIGEAGE
EN PHOTO ELASTICITE



TABLES DES MATIERES

INDEX DES NOTATIONS -

PRINCIPAUX MATERIAUX UTILISES EN PHOTOELASTICITE -

1 - RAPPEL SUR LA PHOTOELASTICITE ET LES DIFFERENTES METHODES HABITUELLEMENT UTILISEES -

1.1 - Définitions générales

1.2 - La photoélasticité : historique

1.3 - Photoélasticimétrie à trois dimensions

1.3.1 - Méthode de Favre

1.3.2 - Méthode de la lumière diffusée

1.3.3 - Méthode du revêtement photoélastique

1.3.4 - Applications des lasers en photoélasticimétrie

1.3.5 - Figeage des contraintes

1.4 - Comparaison de ces différentes méthodes d'analyse

1.5 - Similitude

1.6 - Matériaux utilisés en figeage des contraintes

2 - TRAVAUX ANTERIEURS EFFECTUES SUR L'ETUDE DES MATERIAUX BIREFRINGENTS -

2.1 - Travaux de Monsieur LEVEN

2.2 - Travaux de Messieurs FROCHT et HUI-PIH

2.3 - Travaux de Messieurs J. D'AGOSTINO, DRUCKER, LIU et MYLONAS

2.4 - Travaux de Messieurs SAN-MIGUEL et DUNAN

2.5 - Travaux de Monsieur SAMPSON

3 - TRAVAUX EFFECTUES AU LABORATOIRE DE RESISTANCE DES MATERIAUX DE L'E.N.S.M. SUR L'ARALDITE -

BIBLIOGRAPHIE -

INDEX DES NOTATIONS

$\sigma_I - \sigma_{II} - \sigma_{III}$	contraintes principales
$e_I - e_{II} - e_{III}$	déformations principales
C_1 et C_2	constantes optiques absolues de la matière
C	constante optique relative de la matière
t	épaisseur de la lamelle ou de l'éprouvette
n	ordre de frange
λ	longueur d'onde de la lumière utilisée
ν	coefficient de Poisson
H	valeur de frange des déformations principales
σ_1 et σ_2	contraintes principales secondaires
F	valeur de frange du modèle
f	valeur de frange du matériau
R	retard optique
n_1 et n_2	indice de réfraction du modèle sous tension
n_0	indice de réfraction du milieu libre de tension
K	constante photoélastique
Q	facteur de qualité
σ_c	température critique

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - M. LEVEN
 - Epoxy resins for photoelastic use. Scientific paper 107- 5000 - P1
 - Photoelastic stress and deformation analys of nuclear reactor componens. Scientific Paper 6.94459-2 P.10
 - Photcelastic analysis of reinforced openings and transition sections in spherical and cylindrical vessel, subjected to internal pressure. Research report 907.5900
 - quantitative three-dimensional photoelasticity Exp. Stress analysis Vol. XII n° 2.
- 2 - A. KAMMERER
 - La photoélasticité à trois dimensions.
La pratique des industries mécanique Sept. 58, 229-234.
- 3 - J.L. GUILLO
 - Note technique YOLA n° 196 (S.N.E.C.M.A.)
- 4 - A. ROBERT
 - Méthodes nouvelles en photoélasticimétrie à deux et à trois dimensions. JOBIN et YVON.
- 5 - BUDD. S.A.
 - Théorie du procédé Photostress NIT 9
- 6 - COURRIER
 - Les applications des lasers en photoélasticité et dans l'étude des déplacements.
Centre de Recherche de la compagnie générale d'électricité D.A.O - 68 - 07
- 7 - FROCHT HUI PIH
 - A New cementable material for two and three dimensional photoélastic research
Exp. stress analysis 1954 Vol. 12 n° 1 162-A2
- 8 - J. D'AGOSTINO, DRUCKER, LIU and MYLONAS
 - Epoxy adhesives and casting resins as photoelastic phastics
Exp. stress analysis V 12 n° 2 1955 p. 123-128
- 9 - R.C. SAMPSON
 - A three dimensional photoelastic method for analysis of differential contraction stresses.
Exp. Mechanics oct. 1963, p. 225-235
- 10 - Notice d'utilisation de l'araldite B (CT 200)
Ciba Société anonyme, Bâle (Suisse)

- 11 - FROCHT
 - A new cementable material for two and three dimensional photoelastic research.
Photoelasticity Vol. I et II
- 12 - J. AUBAUD
 - Contribution à la méthode photoélastique de figeage des contraintes, emploi de la résine Markon 7.
La recherche aéronautique n° 30, 1952, p. 51-58
- 13 - B. PERZOZ et G. GRENIER
 - Fluage et biréfringence mécanique de certaines résines organiques.
La recherche aéronautique n° 45 1955 p. 35-40
- 14 - POLUKHIN
 - Etude par photoélasticimétrie des contraintes et des déformations des cylindres de laminoirs à table lisse.
cernaja Metallurgica n° 4 1962 p. 61-75
- 15 - TAYLOR and J.W. SCHWEIKER
 - A three dimensional photoelastic investigation of the stress near a reinforced opening in a reactor pressure vessel.
S.E.S.A. Proceeding Vol. XVII n° 1 p. 25-36
- 16 - D.C. DRUCKER
 - Photoelastic separation of principal stresses by oblique incidence.
Journal of Applied Mechanics Septembre 1943, p. 156-160
- 17 - A. SAN MIGUEL and E.W. DURAN
 - Some low modulus birefringent resins
Exp. Mechanics March 1964 p. 84-88
- 18 - J.T. PIWDERA
 - Remarks on properties of photoviscoelastic model materials
Experimental Mechanics July 1966 p. 375-380
- 19 - COKER et FILON
 - A treatise on photoelasticity
Cambridge at the University Press
- 20 - H.T. JESSOP et F.C. HARRIS
 - Photoélasticité - Dunod
- 21 - A. PIRARD
 - La photoélasticité - Dunod
- 22 - Y.E. CHENG
 - Some techniques for employing a continuous wave gas laser as light. static photoelasticity.
Exp. Mechanics 1966 August p. 431-432.

- 23 - POST
- Isochromatic fringe sharpening and fringe multiplication in photoelasticity.
Exp. stress analysis 1955. Vol. 12 n° 2 p. 143-149.
- 24 - A.J. DURELLI Q.F. RILEY
- Introduction to photomechanics
Prentice Hall - Symonds, Editor.
- 25 - - M. VANDAELE, DASSCHE et R. VAN GEEN
- La biréfringence mécanique en lumière ultra violette
et ses applications.
- 26 - F. VADOVIC
- Contribution to the analysis of errors in photoelasticity.
Exp. Mechanics December 1965. p. 413-416.
- 27 - FROCHT and R. GUERNSEY
- A special investigation to develop a general method
for three dimensional photoelastic stress analysis.
N.A.C.A. Report 1148-1953 p. 1-17
- 28 - P.D. FLYNN
- Photoelastic studies of dynamics stresses in high
modulus materials
Journal of the SMPTE Vol. 75 n° 8 August 1966.

Principaux matériaux utilisés en photoélasticité

Résines

Résines	
Araldite B Araldite D Araldite F	Société Prochal 18 bis, rue d'Anjou PARIS 8e
Trolon Fostérite Castolite Araldite 502 Araldite 501 Araldite 6020 Araldite 6060	Ciba Compagnie. Plastic division, 631, Greenwich Street New York 14 , New York.
Bakélite E.R.L. 2995 Bakélite E.R.L. 2774 Bakélite ZZL0803	Bakélite Compagnie 30 East 42 nd Street New York 17, New York
Epon 828 Epon 834 Epon 1001	Shell Chemical Company 1296 Union Commerce Building, Cleveland, ONIO

Résines	
Epiphen 823	Borden Compagnie, Madison Avenue New York 17.
Epi-Rez 520	Jones - Dabney Compagnie 8411 Hill Boulevard, Louisville 8, Kentucky
Estane TDA PPG LHT 34 LG 56	Union Carbide Chemical Company
Solithane 113 Solithane 300	Thiokol Chemical Corporation
Hysol 2030 Hysol 2085 Hysol 3562 Hysol 4485	Houghton Laboratories 4151 Russel Street, Olean, New York
Armstrong C-1 C-2, C-4, C-9 C-14	Armstrong Company

Durcisseurs

Durcisseurs	
Anhydride phtalique	$C_8H_4O_3$
Acide phtalique	$C_8H_6O_4$
A. Chlorendique	Hooker Electro Chemical Company, Niagara Falls, New York
Anh. Maléique	$C_4H_2O_3$
Anh.dichloromaléique	$C_4Cl_2O_3$
Anh.dodecylsucce- nique	$C_{16}H_{26}O_3$
Anh.hexahydrophtha- lique	$C_8H_{10}O_3$
Pyrrolidine DPI Diethylenetriamine DPI Triethylene Tetramine	E Eastman Kōkak Company

Durcisseurs	
E C ₁	Borden Compagnie
Activator J	Armstrong Compagnie
3 Dimethylaminopropy Lamine	American Cyanamid Company
Diethanolamine	Carbide and Carbon Chemical Company
Methaphenylenedia- mine	General Aniline and Film Corporation
Méthylène dianiline	Dow Chemical Company
Méthaxylène diamine	Oronite Chemicals Company
Wt 15 Wt 17 TEAB	Westinghouse Electric Corp. Benolite Department
HT 901	Société Prochal 18 bis, rue d'Anjou Paris 8e

1 - RAPPEL SUR LA PHOTOELASTICIMETRIE ET LES DIFFERENTES METHODES HABITUELLEMENT UTILISEES -

1.1 - Définitions générales

1.1.1. Isochromatiques

Réseau obtenu directement en photoélasticimétrie.

Lieu géométrique des points du modèle pour lesquels la valeur $(\tau_I - \tau_{II})$ est constante. Cette différence sera toujours positive. Le long d'une isochromatique, le cisaillement maximum τ_m est une constante. D'une courbe quelconque à sa voisine, la différence $(\tau_I - \tau_{II})$ varie d'une quantité constante F (hbars).

- Les points où la différence $\tau_I - \tau_{II} = 0$ font partie de l'isochromatique d'ordre zéro.

- Les points où l'on a $\tau_I - \tau_{II} = F$ constituent l'isochromatique d'ordre un.

- Les points où l'on a $\tau_I - \tau_{II} = n F$ où n est un nombre entier positif, constituent l'isochromatique d'ordre n.

Les isochromatiques d'un réseau sont donc caractérisées par leur ordre n.

1.1.2. Isoclines

Une isocline est le lieu géométrique des points du plan où les contraintes principales ont une direction constante celle des plans de polarisation lors d'une étude expérimentale photoélastique. Chaque isocline est accompagnée d'une cote donnant son orientation par rapport à un axe de référence.

1.1.3. Isostatiques

Les isostatiques ou trajectoires des contraintes principales sont les lignes donnant en chaque point du plan la direction des contraintes principales τ_I et τ_{II} . Elles constituent donc un réseau orthogonal dans tout le champ du modèle.

1.1.4. Points singuliers

Les points singuliers sont les points où les deux contraintes principales sont égales :

$$\tau_I = \tau_{II}$$

De plus, aux points singuliers, les contraintes principales sont égales dans toutes les directions. La matière en un tel point est donc, dans un état de contrainte, analogue à une pression ou à une "traction" hydrostatique.

En un point singulier, les directions principales sont indéterminées.

On trouve fréquemment deux sortes de points singuliers : le point singulier répulsif à trois axes et le point singulier attractif à un axe dont les caractéristiques sont détaillées ci-après.

1.1.4.1 Point singulier attractif du premier ordre à un axe (Fig. 1)

Un point singulier est du premier ordre si pour toute position des polaroides, il passe une, et une seule isocline. Il sera attractif si, lors de la rotation commune des polaroides, dans le sens trigonométrique par exemple, la branche isocline

tourne également dans ce sens

Réseau des isostatiques
obtenu en un point singulier
attraitif à un axe.

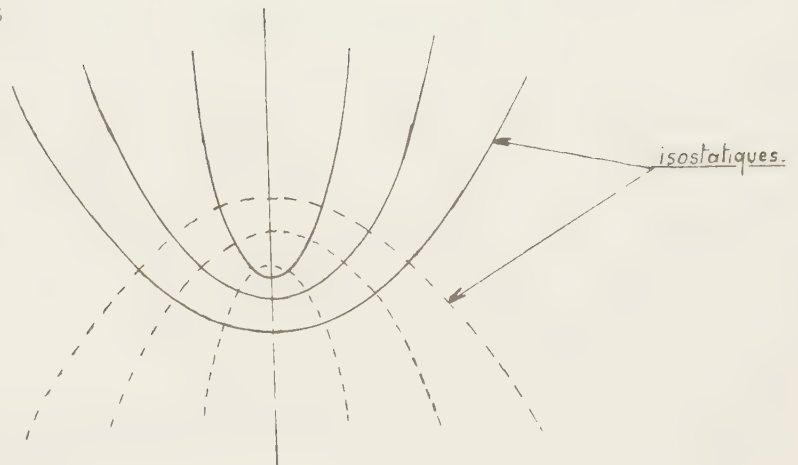


Fig. 1

1.1.4.2. Point singulier répulsif du premier ordre à trois axes (Fig. 2)

La encore, pour toute position des polaroides, il ne passera qu'une seule isocline, mais la branche d'isocline tournera dans le sens opposé de la rotation des polaroides.

Réseau des isostatiques
obtenu en un point singulier répulsif du premier
ordre à trois axes.

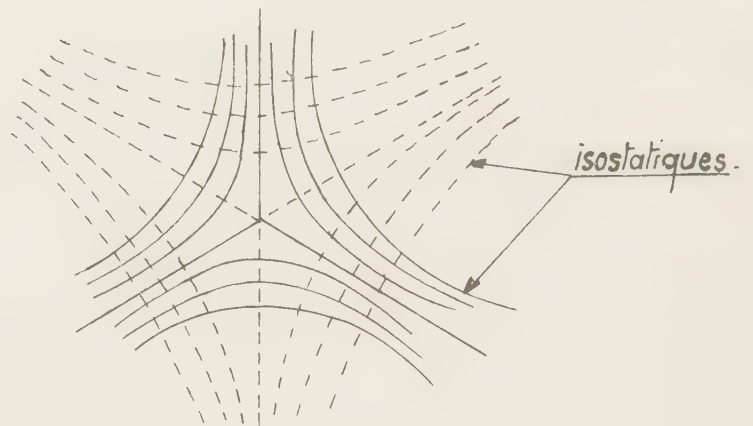


Fig. 2

1.1.5. Polariseur et analyseur circulaires (Fig. 3)

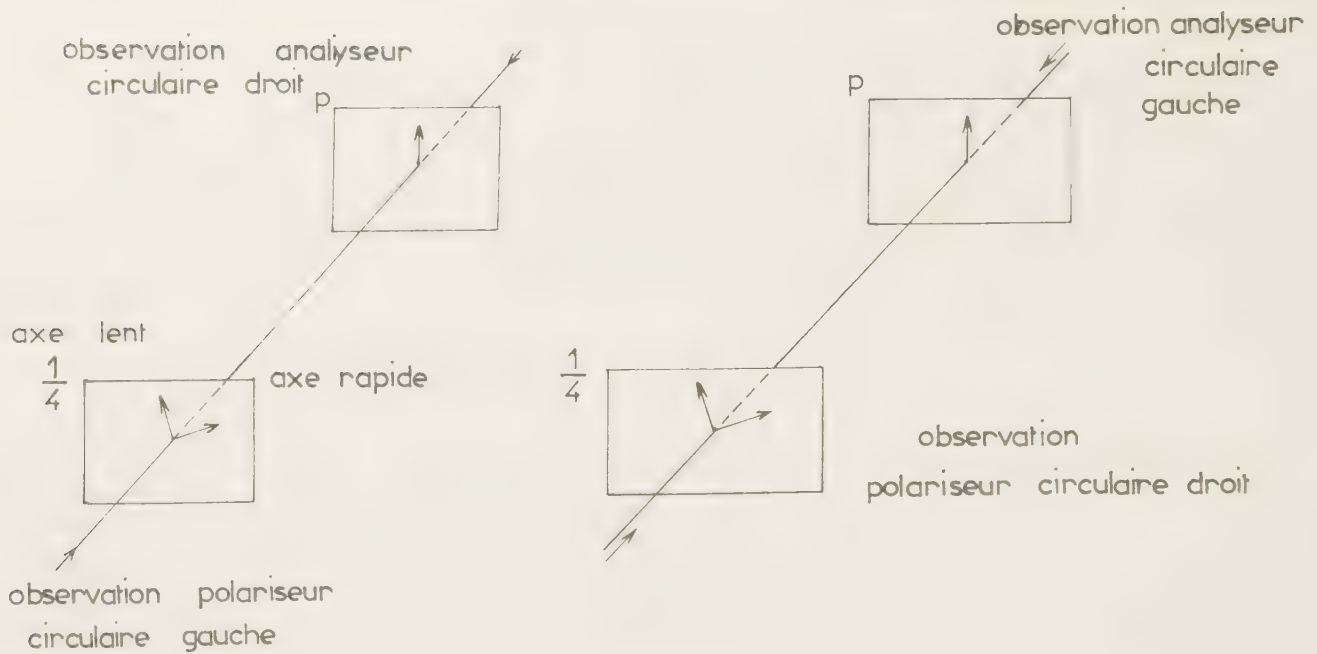


Fig. 3

1.1.6. Bancs de photoélasticité

1.1.6.1. Polariscope plan (Fig. 4)

Un tel polariscope se compose d'un polariseur et d'un analyseur. Polariseur et analyseur étant croisés.

.../..

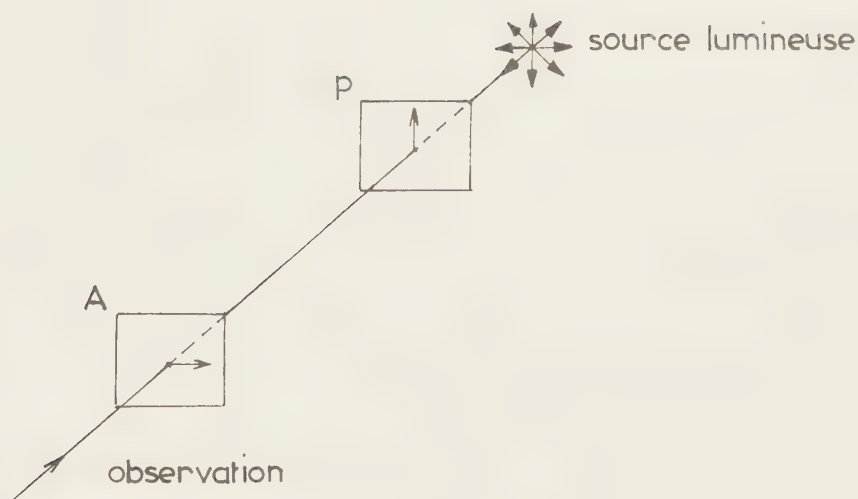
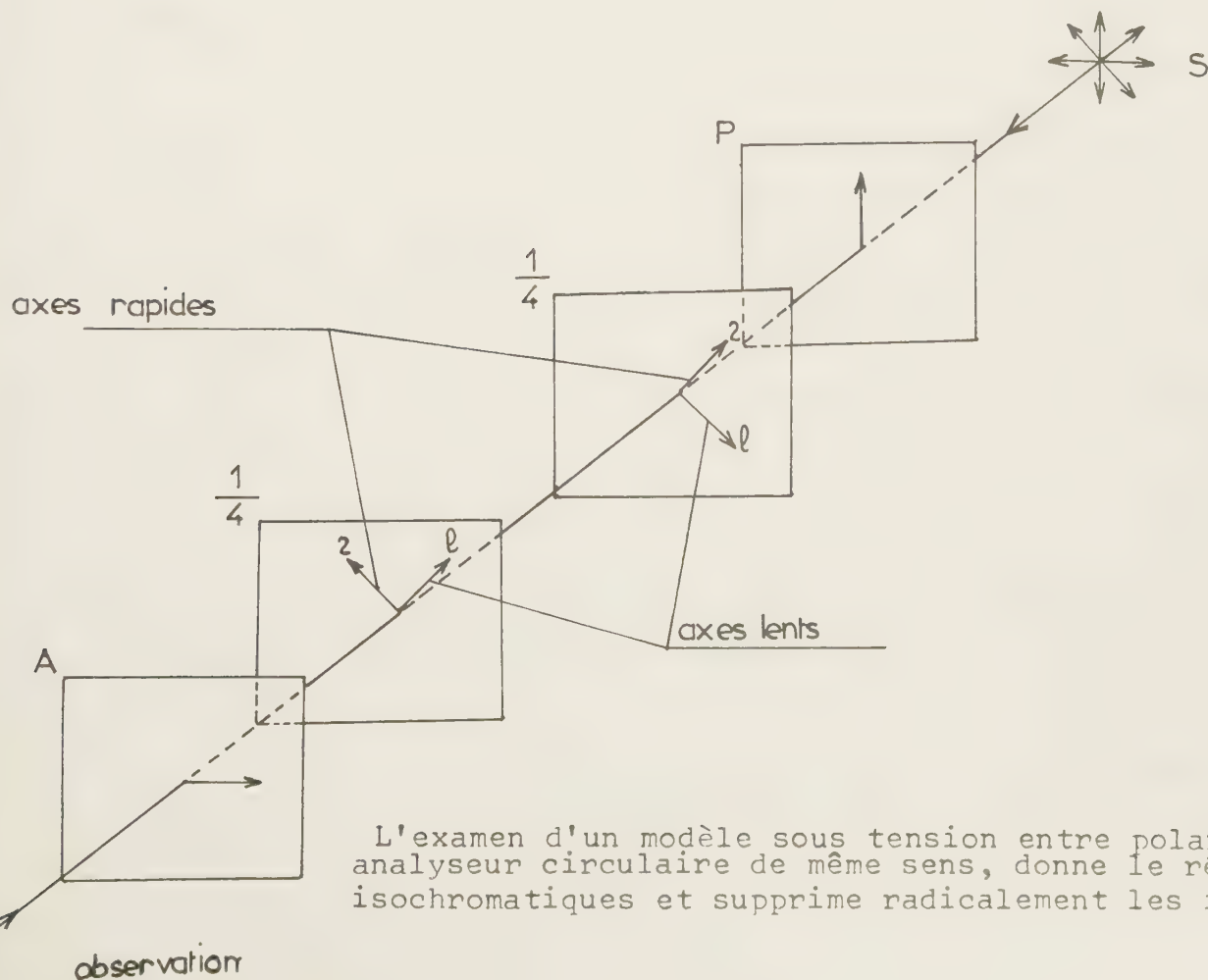


Fig. 4

A l'aide d'un tel polariscope, on obtient le réseau des isochromatiques ainsi que les isoclines.

1.1.6.2. Polariscope circulaire

Un polariscope circulaire se compose d'un polariseur circulaire et d'un analyseur de même sens.



L'examen d'un modèle sous tension entre polariseur et analyseur circulaire de même sens, donne le réseau des isochromatiques et supprime radicalement les isoclines.

1.2. - La photoélasticité : historique

En 1813, Seebeck [21] indiquait la possibilité de rendre biréfringents les milieux isotropes transparents en les soumettant à des forces extérieures. Ces forces extérieures créent dans le milieu des tensions et des déformations internes qui sont la cause d'une anisotropie, source de biréfringence.

En 1815, Sir David Brewster [21] abordait l'étude optique de ce comportement occasionnel des milieux non cristallins et eut également l'idée de remonter des mesures optiques aux tensions internes.

Le premier mémoire technique de photoélasticité semble dater de 1900 et est due à Mesnager.

La biréfringence de corps isotropes sous tensions disparaît avec la cause déformatrice qui l'a provoquée et pour la distinguer de la biréfringence naturelle et permanente des milieux cristallins, on lui donne le nom de biréfringence accidentelle.

Les lois de ce phénomène de biréfringence accidentelle ont été étudiées notamment par Neumann en 1841, J.C. Maxwell en 1853 et Wertheim en 1854. Neumann réussit à relier la double refraction aux déformations, J.C. Maxwell de son côté établit une théorie analogue à celle de Neumann mais reliant directement les vitesses de propagations aux contraintes. Les résultats de ces deux théories sont identiques et l'on peut en tirer une relation fondamentale dite loi de Wertheim.

Loi qualitative

En un point, les directions privilégiées de la biréfrin-

gence accidentelle coïncident avec les directions des contraintes principales.

Loi quantitative

$$n_1 - n_0 = C_1 \sigma_I + C_2 \sigma_{II} \quad (1)$$

$$n_2 - n_0 = C_2 \sigma_I + C_1 \sigma_{II} \quad (2)$$

où C_1 et C_2 sont les constantes optiques absolues

$$n_1 - n_2 = (C_1 - C_2) (\sigma_I - \sigma_{II}) \quad (3)$$

On pose

$C_1 - C_2 = C$ constante optique relative de la matière

$$n_1 - n_2 = C (\sigma_I - \sigma_{II}) \quad (4)$$

avec

$$\sigma_I > \sigma_{II}$$

Le retard R nous sera donné par :

$$R = t (n_1 - n_2) = C (\sigma_I - \sigma_{II}) t \quad (5)$$

t étant l'épaisseur du modèle.

Le retard exprimé en multiple de la longueur d'onde sera :

$$n \lambda = R \quad (6)$$

$$n = \frac{C (\sigma_I - \sigma_{II}) t}{\lambda} \quad (7)$$

d'où

$$\boxed{\sigma_I - \sigma_{II} = \frac{n \lambda}{t C}} \quad (8)$$

La relation (8) étant la relation fondamentale de la photoélasticité.

$\sigma_I - \sigma_{II}$ sera exprimée en hbars

n est appelé l'ordre de frange . Ce nombre sera essentiellement positif.

λ longueur d'onde de la lumière utilisée.

C sera donc exprimée par un nombre inverse d'une tension

On pose également $f = \frac{\lambda}{C}$

$$\sigma_I - \sigma_R = \frac{nf}{t}$$

(8 bis)

f valeur de frange du matériau s'exprime en hbar par frange par mm d'épaisseur.

1.3. - Photoélasticimétrie à trois dimensions

A l'heure actuelle, il existe cinq méthodes essentielles d'investigation des contraintes en photoélasticité.

Nous allons les examiner successivement :

1.3.1. Méthode ^{de} Favre

1.3.1.1. Généralités sur la méthode

Cette méthode est également appelée méthode Sandwich. Elle consiste à isoler un feuillet du modèle à trois dimensions de la manière suivante : le modèle est en matériau peu photoélastique à l'exception d'une petite lamelle, correspondant avec le plan à étudier, qui est en matériau photoélastique.

La lumière polarisée traversant l'ensemble n'est modifiée qu'à la traversée de la lamelle biréfringente et les isochromes et isoclines obtenues caractérisent donc les contraintes situées dans le plan du feuillet .

Cette méthode séduisante présente plusieurs difficultés d'ordre technologique et quelques conditions de principe.

En effet, seuls les plans de symétrie, ou les plans principaux, pourront être matérialisés par le feuillet. Car si l'effet optique observé en faisant traverser le feuillet par de la lumière polarisée doit représenter le retard relatif des deux ondes polarisées dans deux directions perpendiculaires, les directions de polarisation dans le plan d'onde doivent alors rester sensiblement constantes pendant toute la traversée de la lamelle.

Si la différence moyenne des contraintes principales déduite du retard doit être interprétée comme étant la différence des contraintes principales dans le plan du feuillet, les contraintes principales doivent demeurer sensiblement constantes dans l'épaisseur du feuillet. Pour cela, il faudra que le feuillet soit inclus suivant un plan perpendiculaire à l'une des directions principales.

La méthode est donc assez limitative, car il est assez difficile de connaître à priori un plan principal, hormis les plans de symétrie.

Nous avons vu que le feuillet qui sera le plus souvent un feuillet d'analdite doit être inclus dans une masse non photoélastique qui le plus souvent sera faite en altuglass. Cette opération étant une opération délicate, un collage parfait sera nécessaire entre l'éraldite et l'altuglass, afin d'avoir un

comportement normal du modèle. La solution optimum étant de ne pas réaliser un collage, mais plutôt une polymérisation entre le feuillet d'araldite et l'altuglass. Cette dernière solution a été réalisée dans les laboratoire de l'E.N.S.M.

Pour le choix des deux matériaux constituant le modèle, deux critères nous guiderons.

1) Choisir deux matériaux ayant une constante optique relative C très différente.

2) Concordance si possible des modules d'Young et des coefficients de Poisson de ces deux matériaux.

1.3.1.2. Réalisation du feuillet photoélastique

Nous avons choisi l'altuglass 4052-Z et l'araldite D, cette solution étant un compromis satisfaisant aux deux critères énoncés plus haut.

Les difficultés techniques ont résidé dans l'obtention du feuillet d'araldite. Nous avons préparé un moule en altuglass conçu de la façon suivante : deux lames épaisses d'altuglass ont été collées de part et d'autre d'une fine lame d'altuglass, cette dernière ayant la forme d'un u. Après collage, il existait donc un espace vide entre les deux lames épaisses (Fig. 6)

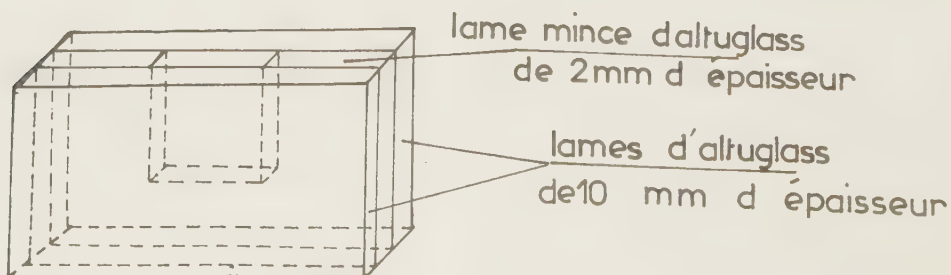


Figure 6

Ce moule est ensuite porté à une température de $95^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}$ dans une étuve. Afin d'éviter les déformations ou le maintient entre deux parois métalliques planes.

Le feuillet est constitué d'araldite D, les durcisseurs choisis sont l'anhydride phtalique et l'acide phtalique. Leurs compositions sont les suivantes :

- Araldite D 100 pp
- Anhydride phtalique ($\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_3$) 23 pp
- Acide phtalique ($\text{C}_8\text{H}_6\text{O}_4$) 7 pp

On porte l'araldite D à 140°C , une fois la température atteinte, on verse l'anhydride phtalique que l'on dissoud, on ajoute ensuite l'acide phtalique. Le mélange prend alors une teinte laiteuse qui disparaît lentement pour reprendre la teinte claire de l'araldite.

On procède alors à la coulée de la préparation dans le moule, de préférence sans le sortir de l'étuve.

En cours de polymérisation, il se crée des bulles d'air, pour les éviter, aussitôt la coulée, on place le moule sous une cloche à vide pendant quelques minutes.

-17-

A 95° la polymérisation s'effectue en 100 heures environ. Le refroidissement s'effectue ensuite lentement jusqu'à la température ambiante. La vitesse de refroidissement étant de l'ordre de 10° par heure.

1.3.1.3. Réalisation de la maquette

La polymérisation étant terminée, on constitue un bloc par collage de lames d'altuglass. Ensuite, on usine le modèle de telle sorte que le plan moyen de la lame mince d'araldite coïncide avec le plan dans lequel on désire déterminer les contraintes.

1.3.1.4. Analyse photoélasticimétrique

La surface de la pièce étant quelconque, il sera nécessaire pour éviter tous phénomènes de réfraction de l'immerger dans une cuve contenant un liquide dont l'indice soit le plus voisin possible de l'altuglass soit 1,4898. Cet indice voisin est obtenu par un mélange d'huile de valeline $n = 1,4676$ et de phénochlore $n = 1,6848$.

La cuve possède deux parois planes, transparentes et parallèles. Un faisceau de lumière polarisée la traverse orthogonalement. L'analyse sera donc ramenée à un problème à deux dimensions, c'est-à-dire un problème plan.

1.3.1.5. Exemple d'étude réalisée à l'E.N.S.M. par la méthode de Favre [2]

Nous avons réalisé une étude qualitative : l'examen de la répartition de contraintes sous la tête d'un boulon ainsi que dans l'écrou de serrage. Cette étude a mis immédiatement

en lumière deux faits bien connus en construction mécanique :

Le premier : Le serrage sur la tête du boulon ne s'effectue non pas d'une manière uniforme, mais seulement sur une couronne. Ceci provoquant un gradient de contraintes assez élevé.

Le second : que seuls les premiers filets "encaissent" l'effort de serrage, et de plus la majoration de contrainte sur le premier filet est très importante.

Dans le même ordre d'idée, nous avons fait une étude comparative entre un filet I.S.O et un filet rond. Le résultat est immédiat, non seulement la répartition de l'effort de cisaillement se fait sur un plus grand nombre de filets dans le cas du filet rond, mais de plus, le gradient de contrainte est bien plus faible.

Les figures 8, 9 et 10 sont relatives à cette étude.

1.3.1.6. Avantages de la méthode

Le premier de ces avantages est d'opérer à la température ambiante. A cette température, le coefficient de Poisson ν du matériau d'essai est voisin du coefficient de Poisson de l'acier. D'où une similitude presque parfaite des déformations.

Le deuxième avantage de cette méthode est qu'il n'est pas utile de découper la pièce pour analyser un modèle à trois dimensions.

(a) filet ISO

majoration importante sur
le premier filet.

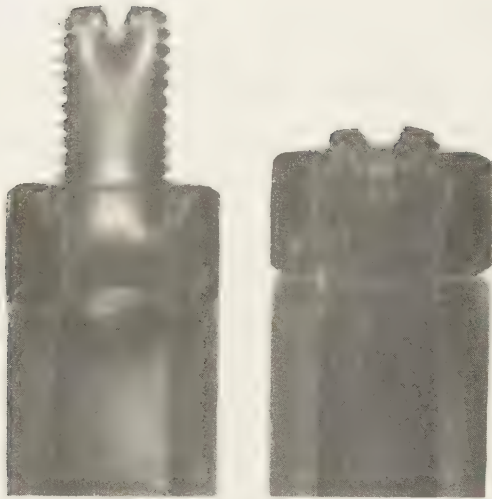
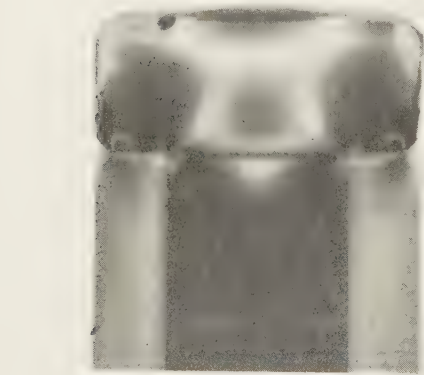


Fig. 8

(b) filet rond

répartition continue
de l'effort



On remarque deux couronnes
de serrage.

Fig. 9



Comparaison de la répartition
de l'effort de serrage en-
tre un boulon à filet rond
et un boulon à filet ISO.

Fig. 10

1.3.1.7. Inconvénients de la méthode

L'inconvénient majeur de cette méthode réside dans la réalisation de la maquette. Il est relativement difficile d'obtenir un feuillet d'araldite parfaitement polymérisée avec l'altuglass. De plus, et ceci n'est pas un inconvénient au sens propre du terme, mais un impératif, il est nécessaire que la maquette possède des formes qui puissent s'obtenir par usinage. En effet, il est impossible de réaliser des pièces possédant des formes brutes telles que des bossages ou des contours elliptiques.

Le deuxième inconvénient est que l'étude ne peut se faire que dans un plan de symétrie ou tout autre plan principal connu d'avance, ceci est quand même assez limitatif. Disons que pour toutes pièces possédant une symétrie de révolution, l'analyse sera relativement simple.

1.3.2. Méthode de la lumière diffusée [4]

Cette méthode étudiée par Weller et Bussv tout dernièrement par A. Robert est fondée sur la propriété que possèdent certaines substances de diffuser la lumière en la polarisant rectilignement dans une direction perpendiculaire au rayon incident si la lumière incidente était naturelle

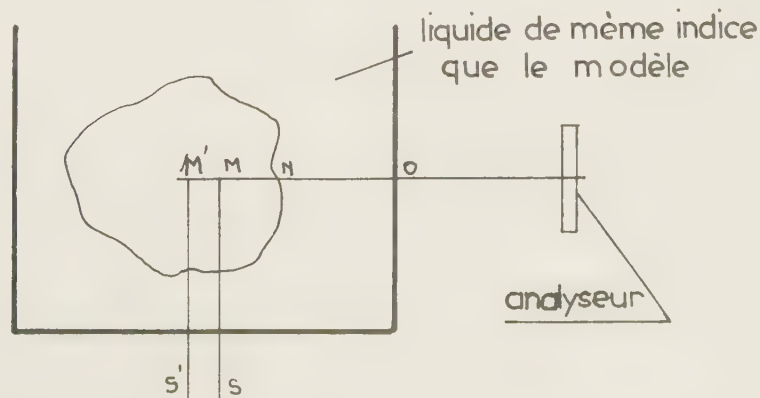


Figure 11

Un rayon incident non polarisé SM est observé dans la direction perpendiculaire Mo En M la lumière diffusée suivant Mo est polarisée rectilignement de M en N par l'état de contrainte du modèle et peut être étudié au moyen d'un analyseur. Si maintenant on déplace parallèlement à lui-même le rayon incident de S en S', le point M vient en M'. La lumière diffusée polarisée est cette fois modifiée sur le trajet M M' et la différence entre l'état de polarisation avant et après déplacement du faisceau incident est due uniquement aux contraintes régnant entre M et M'.

On a donc, comme dans la méthode précédente, isolé un feuillet, cette fois par une méthode purement optique. Cette méthode est en plein essor à l'heure actuelle. Sa principale qualité est d'être parfaite sur le plan théorique, mais des difficultés s'offrent sur le plan technique. En effet, il faudra figer un modèle, faire une analyse en tous points du modèle, reporter ces résultats, tracer de nombreuses courbes et de ces dernières en déduire des résultats pratiques, c'est-à-dire les forts gradients de contraintes.

1.3.3. Méthode du revêtement photoélastique - Procédé photostress [5]

L'étude des contraintes par la méthode du revêtement photoélastique consiste à observer en lumière polarisée des structures réelles recouvertes d'une mince couche d'un matériau biréfringent. La lumière est réfléchiée sur la face du revêtement qui est en contact avec la structure. On considère dans la théorie que la lumière traverse sans réflexion le double de l'épaisseur du matériau biréfringent.

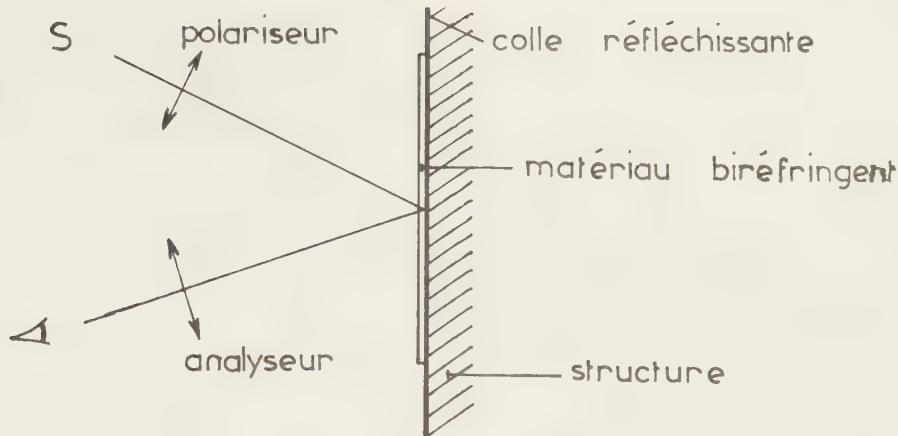


Figure 12

Le retard optique sera donc donné par la formule :

$$R = 2tc (\nabla_I - \nabla_{II}) \quad (9)$$

Le revêtement photoélastique étant parfaitement collé à la structure, les déformations sont identiques.

$$(e_I - e_{II})_m = (e_I - e_{II})_3 = e_I - e_{II}$$

L'indice m étant celui du matériau biréfringent et l'indice S étant celui de la structure.

E_m et U_m étant respectivement le module d'Young et le coefficient de Poisson du matériau biréfringent, on a :

$$e_I = \frac{1}{E_m} [\nabla_I - U_m \nabla_{II}] \quad (10)$$

$$e_{II} = \frac{1}{E_m} [\nabla_{II} - U_m \nabla_I] \quad (11)$$

$$\nabla_I - \nabla_{II} = \frac{E_m}{1+U_m} (e_I - e_{II}) \quad (12)$$

Des relations (9) et (12) on tire :

$$R = 2tK (\varepsilon_I - \varepsilon_{II}) \quad (13) \quad \text{avec} \quad K = \frac{CE_m}{1+U_m}$$

$$\varepsilon_I - \varepsilon_{II} = \frac{n\lambda}{2tK} \quad (14)$$

$$\text{ou} \quad \varepsilon_I - \varepsilon_{II} = nH \quad (15) \quad \text{avec} \quad H = \frac{\lambda}{2tK}$$

.../...

On pourra donc par simple lecture, déterminer la différence des contraintes principales ainsi que leur direction. Le plus souvent, pour séparer les contraintes, il sera nécessaire d'effectuer des mesures en incidence oblique.

L'atout majeur de cette méthode est d'opérer sur la structure réelle, éliminant ainsi les problèmes de similitude (échelle des longueurs et échelle des forces). Par contre quelques inconvénients subsistent :

- Renforcement dû au photostress dans le cas de structure mince. Celui-ci se présente sous deux aspects : d'une part, il rigidifie la plaque ; d'autre part, en flexion les couches de plastique les plus éloignées de la ligne neutre donnent des indications plus grandes que les vraies valeurs à la surface de la plaques.

- La constante photoélastique de ces matériaux est relativement faible : $K = 0,083$. Pour du photostress de 3 mm collé sur le l'acier, la valeur de frange est de l'ordre de 17 kg/mm^2 , alors qu'elle n'est que de $6,2 \text{ kg/mm}^2$ pour de l'aluminium, d'où son utilisation plus aisée sur des structures en aluminium.

- Difficulté de tracer le réseau des isoclines ainsi que celui des isochromatiques.

1.3.4 Applications des lasers en photoélasticité 6

1.3.4.1. Utilisation des lasers en photoélasticité classique

En photoélasticité classique on utilise le laser comme source lumineuse. Le Professeur K. Morth a utilisé un laser à gaz hélium néon. La puissance de telle lumière est bien supérieure aux lumières utilisées jusqu'ici. Le tableau 1 donne une comparaison.

	Arceau Hg filtré 250 W	Laser Hélium Néon	Laser Argon ionisé
Puissance Collimatée milliwatts	10	50	100
λ en Å	5460	6328	4880

Tableau 1

1.3.4.2. Photoélasticimétrie holographique tridimensionnelle

Nous assistons, en ce moment, à la naissance d'une nouvelle voie de recherche en photoélasticité.

L'idée de base est l'holographie interférométrique. On prend un hologramme de l'objet, dont nous voulons étudier la déformation, au repos. Après développement, l'hologramme est remis dans la position dans laquelle il a été enregistré. Si maintenant, nous illuminons celui-ci par un faisceau de référence, on obtient une reproduction de l'objet et l'objet lui-même sont superposés et l'on ne perçoit qu'une seule image. Mais, si l'on déplace un peu l'objet, ou si on le déforme légèrement, des franges apparaissent. Ces franges représentent les contours des surfaces d'équidéplacement.

On peut opérer avec une légère différence en prenant un hologramme double. On enregistre un premier hologramme de l'objet, l'objet est ensuite un peu déplacé ou déformé et nous enregistrons un deuxième hologramme sur la même plaque. On peut alors enlever l'objet. Si maintenant, on développe l'hologramme et si on le remet en place, on observe des franges d'interférence semblables à celles observées dans le cas précédent. Cependant, dans ce cas, le système de frange est "figé" et il est uniquement déterminé par

les positions de l'objet pendant les enregistrements successifs des deux hologramme.

Le seul résultat obtenu est donc les courbes d'équidéplacement, et il sera possible, connaissant celles-ci de déterminer, à l'aide de calculs complexes, les contraintes principales.

1.3.5 Figéage des contraintes

1.3.5.1. Généralités

Si l'on soumet certaines matières plastiques telles que le trolon, la fostérite, la castolite, la bakélite, l'araldite à une charge, ou à état de chargement pendant qu'elles sont chauffées à une température critique, puis refroidies lentement toujours avec action de la charge, on constate qu'en déchargeant le modèle, lorsque la température ambiante est atteinte, le matériau conserve certaines propriétés optiques.

Par examen, à travers un polariscope, on observe un réseau des franges isochromatiques similaire à celui obtenu sur le modèle n'ayant subi aucun traitement thermique et soumis à une charge identique. Le rapport du retard relatif produit dans le modèle à la charge appliquée, est beaucoup plus grand avec le modèle figé qu'avec un modèle contraint à la température ambiante. Ceci provenant du fait qu'à la température ambiante, la constante photoélastique relative C qui est de l'ordre de 1700 brewsters, est beaucoup plus grande qu'à l'ambiante où sa valeur est de 30 brewsters, ceci pour l'araldite envisagée.

On constate également que les franges isochromatiques figées restent inaltérées lorsque le matériau est coupé ou percé Fig. 11 et 12.

Donc, la biréfringence étant conservée à l'intérieur du modèle, il sera possible de découper celui-ci en fines lamelles qui seront examinées en lumière polarisée exactement de la même façon que les modèles plans.

Les lignes isochromatiques et isoclines ainsi obtenues sont caractéristiques des contraintes qui régnaient pendant le chargement dans le feuillet ainsi matérialisé.

Quelques conditions analogues à celles énoncées au § 4.1.1. seront à respecter.

Le plan de la lamelle devra être soit un plan de symétrie soit un plan principal.

Si l'on découpe une lamelle quelconque contenant le plan π par exemple (Fig. 13), et si l'on observe cette lamelle au banc de photoélasticité, nous mesurerons la différence $\sigma_I - \sigma_{II}$. σ_I et σ_{II} étant les contraintes qui s'exercent dans le plan π (voir Fig. 13 ellipsoïde des contraintes).

De cette différence, nous ne pouvons tirer aucune indication au sujet des directions et intensités des contraintes principales. Il sera donc nécessaire de connaître la direction d'une des contraintes principales.

Les contraintes σ_I et σ_{II} sont également appelées contraintes principales secondaires.

.../...

Réseau d'isochromatiques
"figé" produit par trois
charges radiales dans un
disque en araldite B.



Fig. 11

Réseau d'isochromatiques
"figé" et montrant la per-
sistance des franges après
découpage du modèle.



Fig. 12

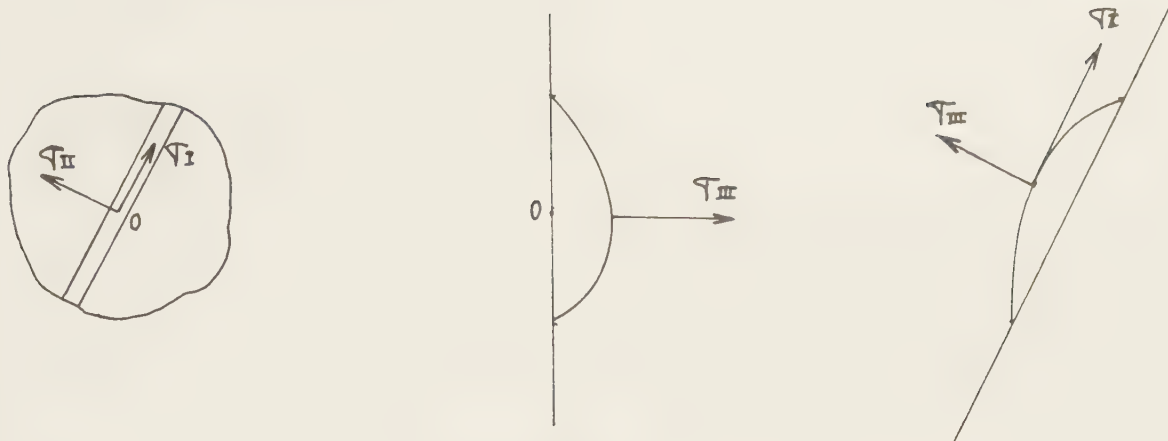


Fig. 13

1.3.5.2. Possibilités de mesure

1.3.5.2.1. Cas d'une surface libre

En un point quelconque d'une surface libre, un des axes principaux est normal à la surface libre. Donc, si nous découpons, une mince lamelle, en effectuant un sciage parallèle au plan tangent à la surface en un point quelconque 0, les contraintes σ_I et σ_{II} qui sont dans le plan tangent, sont alors les contraintes principales au point 0. Nous supposons donc que la lamelle a une épaisseur faible pour négliger les variations en direction et intensité des contraintes σ_I et σ_{II} à travers l'épaisseur σ_{III} étant évidemment nulle.

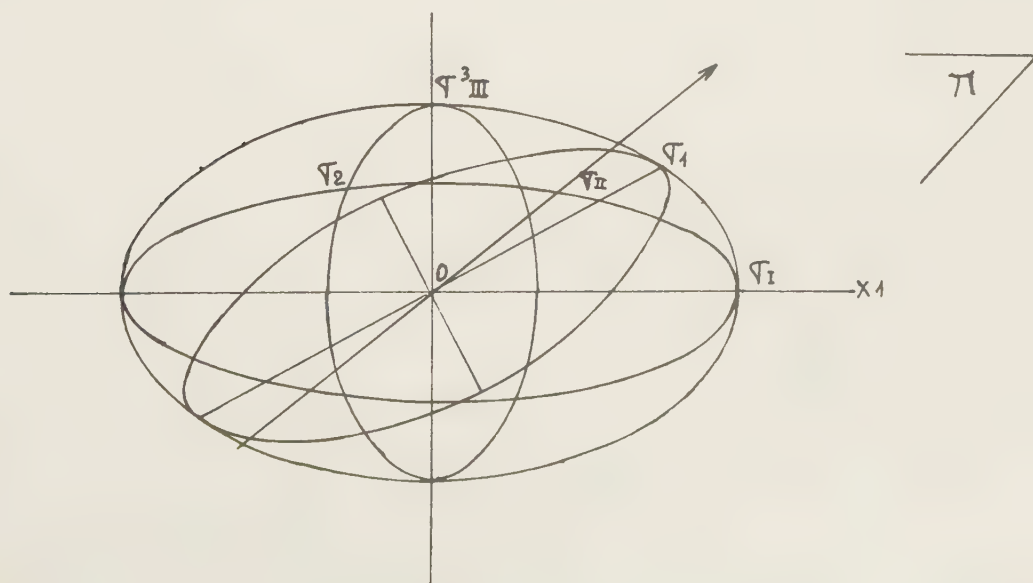


Fig. 14

Si l'on examine cette lamelle dans un polariscope, l'isocline passant au point 0 nous permettra de déterminer les directions principales σ_I et σ_{II} . Nous pouvons à nouveau découper de la première lamelle une lamelle parallèle à σ_{II} par exemple, et déterminer ainsi la valeur de σ_{II} et ensuite celle de σ_I .

1.3.5.2.2. Cas d'un plan de symétrie

Si les chargements sont symétriques par rapport à un plan de symétrie, ce plan de symétrie est un plan principal des contraintes. Il sera donc possible de découper une lamelle contenant ce plan de symétrie et d'étudier les contraintes principales dans ce plan de symétrie.

1.3.5.2.3. Détermination de la contrainte en un point extérieur non chargé

Soit à déterminer l'état de contrainte en un point A quelconque sur la paroi extérieure du modèle. On découpe une lamelle telle que le point A soit dans le plan médian de celle-ci.

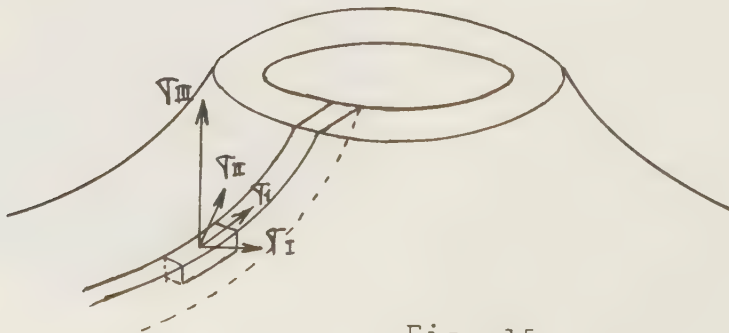


Fig. 15

Si l'on examine cette lamelle en incidence normale, on mesurera la contrainte principale secondaire σ_{II} .

De cette même lamelle, on découpera une fine tranche que l'on observera suivant σ_{III} . Cette observation nous donnera la différence des contraintes principales $\sigma_I - \sigma_{II}$ ainsi que l'angle α que fait σ_1 avec σ_I .

Ces trois mesures permettent de déterminer la valeur des contraintes principales σ_I et σ_{II} .

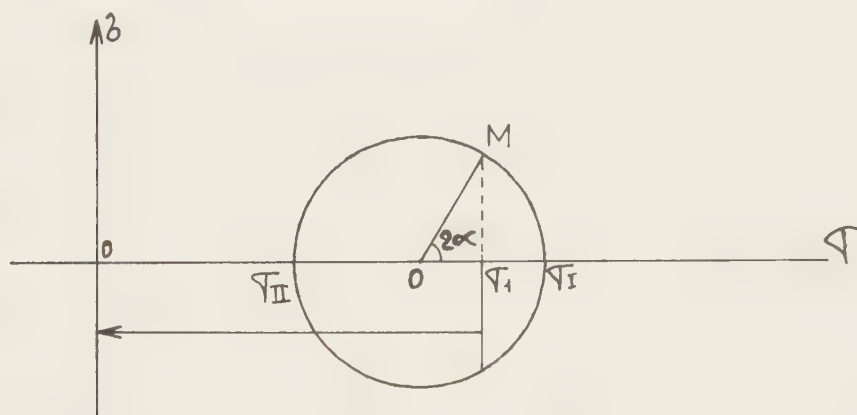


Fig. 16

La mesure $\sigma_I - \sigma_{II}$ nous permet de tracer le cercle de Mohr ayant son centre sur l'axe des σ et pour diamètre $\sigma_I - \sigma_{II}$. On trace ensuite le rayon vecteur OM tel que $\widehat{TOM} = 2\alpha$. Le point M étant ainsi déterminé, on le rabat en σ_1 sur l'axe des σ . La première mesure nous ayant donné σ_1 nous permet de positionner l'axe des σ . D'où la connaissance de σ_1 et σ_{II}

Le choix entre la méthode énoncée au § 4.3.5.2.1 et celle du § 4.3.5.2.3 sera fonction de la forme de la pièce.

1.4. - Comparaison de ces différentes méthodes d'analyse

Ces méthodes, bien que semblables sur le plan théorique, diffèrent par leur conception technologique.

La méthode de Favre, nous l'avons vu, est très limitative. De plus, la réalisation d'une maquette de forme complexe est difficile. Par contre, si la pièce est relativement simple et si de plus, elle est symétrique, cette méthode sera facilement applicable.

Le matériel dont nous disposons, ne nous a pas permis d'effectuer d'essai en lumière diffusée. Méthode qui par ailleurs, présente pour le problème qui nous intéresse des difficultés d'exploitation des résultats.

La méthode du revêtement photoélastique a pour elle l'avantage d'opérer sur la structure réelle, mais tout paradoxal que cela puisse être, c'est également un inconvénient. En effet, cela suppose effectuer l'analyse sur la pièce terminée, et si le résultat impose une modification des formes, il sera nécessaire d'exécuter une nouvelle pièce. La détermination des formes se fera itérativement. Si l'analyse n'est qu'une vérification, ou une comparaison notamment avec des mesures extensométriques, la méthode conviendra. Mais si l'analyse a pour objet l'étude d'une pièce de volume important, comme une coquille de condenseur par exemple, il est peu recommandé d'utiliser cette méthode. En effet, on n'imagine pas l'usinage de quatre ou cinq coquille à l'échelle 1 et de formes différentes.

La méthode du laser quand à elle ne permet pas à l'heure actuelle l'exploitation facile des résultats.

En comparaison de ces différentes méthodes, celle du figeage des contraintes présente de nombreux avantages :

- Possibilité d'exécuter une maquette à échelle réduite.
- Cette maquette pouvant être de formes quelconques.
- Connaissance parfaite de l'état de contrainte en tous points.

Les méthodes de Favre, du revêtement photostress et du figeage des contraintes ont fait l'objet d'études dans les laboratoires de l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique de Nantes. Nous avons donc pu comparer les différents résultats ainsi que les différentes possibilités. Notre préférence s'est portée sur la méthode du figeage des contraintes.

1.5. - Similitude

1.5.1. Similitude des formes

La forme de la maquette doit être rigoureusement homothétique de celle de la pièce réelle, afin que la distribution de contraintes soit la même dans la maquette que dans la pièce réelle.

1.5.2. Similitude des chargements

Les contraintes dans la maquette (σ'_i) et dans la pièce réelle (σ_i) sont données par la relation de Lamé :

$$\sigma_i = \lambda \theta + 2G e_i$$

$$\sigma'_i = \lambda' \theta' + 2G e'_i$$

S'il y a similitude, les rapports $\frac{\sigma'_i}{\sigma_i}$ (échelle des contraintes) et $\frac{e'_i}{e_i}$ (échelle des déformations) sont constants. En appelant $\frac{\sigma_m}{\sigma_r}$ et $\frac{e_m}{e_r}$ ces deux échelles :

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_m}{\sigma_r} \sigma_i &= \sigma'_i = \frac{\sigma_m}{\sigma_r} \cdot \frac{E_r}{1+\nu_r} \left(\frac{\nu_r}{1-2\nu_r} \theta_i + e_i \right) \\ &= \frac{\sigma_m}{\sigma_r} \cdot \frac{e_r}{e_m} \cdot \frac{E_r}{1+\nu_r} \left(\frac{\nu_r}{1-2\nu_r} \theta'_i + e'_i \right) \end{aligned}$$

ou

$$\sigma'_i = \frac{E_m}{1 + \nu_m} \left[\frac{\nu_m}{1 - 2\nu_m} \theta'_i + e'_i \right]$$

L'identification conduit à

$$\begin{cases} \nu_m = \nu_h \\ \frac{E_m}{E_h} = \frac{\sigma_m}{\sigma_h} = \frac{e_h}{e_m} \end{cases}$$

La similitude rigoureuse exige également que les déplacements soient à l'échelle des longueurs, ainsi l'échelle des déformations $\frac{e_m}{e_h}$ sera à l'échelle 1, par suite l'échelle des contraintes sera égale au rapport des modules.

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_h} = \frac{E_m}{E_h}$$

Si la sollicitation est une pression, le rapport des pressions sera donc égale au rapport des modules d'Young.

$$\frac{P_m}{P_h} = \frac{E_m}{E_h}$$

Dans le cas d'une force appliquée, l'échelle des forces sera donnée par :

$$\frac{F_m}{F_h} = \frac{E_m}{E_h} \times \left(\frac{l_m}{l_h} \right)^2 \quad \frac{l_m}{l_h} = \text{échelle des longueurs}$$

Dans le cas d'un couple qui a pour dimension le produit d'une longueur par une force, l'équation de similitude est :

$$\frac{\Gamma_m}{\Gamma_h} = \frac{E_m}{E_h} \times \left(\frac{l_m}{l_h} \right)^3$$

Lorsqu'il est possible de réaliser le modèle en utilisant une matière identique à celle qui constitue le solide réel, la première condition est vérifiée ($\nu_m = \nu_r$). Dans les essais de photoélasticimétrie, il n'en est pas ainsi ($\nu_m \neq \nu_r$). Par suite, pour un modèle rigoureusement homothétique du solide réel, la similitude des forces étant aussi rigoureusement respectée, la répartition des contraintes et les déformations seront différentes dans le modèle et le solide réel.

1.6 - Matériaux utilisés en figeage des contraintes

1.6.1. Caractéristiques du matériau idéal

Pour les essais en figeage des contraintes, les propriétés que doit posséder un matériau peuvent s'énumérer comme suit :

1.6.1.1. Facteur de qualité ou "Figure of merit"

Ce sont les Anglo-Saxons et plus précisément M. Leven [1] qui a défini ce facteur $Q = \frac{E}{f}$, où E est le module d'élasticité du matériau constituant le modèle, f étant la valeur de frange du matériau, c'est-à-dire la différence de contraintes principales produisant une différence de biréfringence d'un ordre par unité d'épaisseur. La valeur de E étant déterminée à la température critique de figeage.

M. Leven a exprimé le module d'Young E en p.s.i et la valeur de frange f en psi/inch.

.../...

La relation métrique est donc :

$$Q = 25,4 \times \frac{1}{\lambda} \times 10^2 \times C \times E \quad (17)$$

E en hbars

C en brewsters

λ en $\text{\AA}$

On peut également exprimer Q en fonction de la sensibilité optique du matériau.

$$\sigma_I - \sigma_{II} = n \frac{P}{t}$$

$$\epsilon_I - \epsilon_{II} = \frac{n \lambda}{t K}$$

$$\sigma_I - \sigma_{II} = \frac{E}{1+\nu} (\epsilon_I - \epsilon_{II})$$

$$\frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{n \lambda}{t K} = \frac{n P}{t}$$

$$Q = \frac{E}{P} = \frac{1+\nu}{\lambda} K \quad (18)$$

Q est donc fonction de la sensibilité du matériau, d'où le choix d'un matériau possédant un facteur de qualité élevé.

1.6.1.2. Effets de bord

Les effets de bord sont dûs à l'évaporation de produits volatils contenus dans le durcisseur ainsi qu'à l'absorption par la résine de la vapeur d'eau de l'atmosphère. La plupart des matériaux biréfringents sont soumis aux effets de bord. La conséquence apparente de l'effet de bord est la biréfringence de bordure que les modèles acquièrent au bout de quelques jours, voi-

re même au bout de quelques heures. Ainsi, sur des bords fraîchement coupés, il apparaît des isochromatiques.

On choisira donc un matériau peu sujet à l'effet de bord.

1.6.1.3. Contraintes initiales

Les contraintes initiales ou résiduelles sont dues au moulage (retrait). Un traitement approprié permettra de les diminuer en grande partie.

1.6.1.4. Conservation de la biréfringence figée

La biréfringence figée doit se maintenir sans variation durant toute la durée d'exploitation des résultats. Il est donc nécessaire que le matériau soit stable dans le temps.

1.6.1.5. Remarque

Il paraît assez difficile de classer par ordre d'importance les propriétés énoncées ci-dessus : en effet, le manque de l'une d'elles suffit à rendre le matériau inutilisable en photo-élasticité.

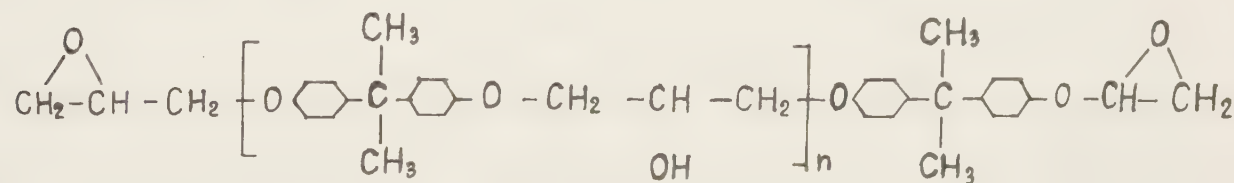
.../...

2 - TRAVAUX ANTERIEURS EFFECTUES SUR L'ETUDE DES MATERIAUX BIREFRINGENTS -

2.1. Travaux de Monsieur Leven [1]

Un des chercheurs qui s'est le plus illustré dans l'étude des matériaux biréfringents est M. Leven. Ses études ont été poursuivies dans les laboratoires de recherche de la Société Westinghous à Pittsburg en Pensylvanie. Elles ont particulièrement porté sur les résines époxy. Ces résines sont le produit de condensation de l'épichlorohydrine et de phénol polyhydric habituellement appelé diphenylol propane.

La structure de ces résines peut être représentée par la formule :



Les résines commerciales sont des mélanges de polymères dans lesquels n varie entre 0 et 10. Pour les liquides qui ont leur poids moléculaire le plus bas n = 0. Les résines à poids moléculaire intermédiaire (n = 2 ou 3) sont généralement fragiles.

2.1.1. Propriétés de quelques résines epoxy

Tableau II

Exposy	Viscosité à la température du mélange	E	f	Q	temps	effet de bord
		P.S.I.	Psi/fr inches		°C	fringes/ inches
Bakélite ERL 2795	1 poise	1.790	1,84	973	100	- 2,4
Araldite 502	35 "	2.390	1,79	1.335	100	- 2,4
Bakélite ERL 2.774	100 "	3.600	2,20	1.636	133	- 3,2
Epon 828	124 "	2.140	2,04	1.050	125	- 3,2
Araldite 6020	215 "	3.550	2,11	1.612	133	- 3,2
Epon 834	1000 "	2.730	1,81	1.510	145	- 3,2
Epiphon 823	2350 "	5.100	2,55	2.000	147	- 2,2
Araldite 6060	61°C	2.160	1,30	1.660	130	- 3,3
Epon 1001	70°C	2.75	1,30	1.600	130	- 3,3
Epi Rez 520	70°C	2.200	1,30	1.690	130	- 3,3

L'agent durcisseur étant l'anhydride phtalique (40 p.p)

Dans l'ensemble, les propriétés de ces résines sont similaires, notamment en ce qui concerne le facteur Q, la température critique ainsi que l'effet de bord. On notera que les effets de bord sont assez importants.

.../...

2.1.2. Propriétés de la bakélite ERL 2774 préparée avec différents anhydres

Anhydride	p p anhydride	T _C °C	Q	Exother- mie *	effet de bord après 405 n/inch.	Usinabi- lité	Transparance
Phtalique C ₈ H ₄ O ₃	55	162	2150	1	-0,5	bonne	bonne
Chlorendique	65	220	2280	5	-0,6	médiocre	-
Nadique	80	140	1400	0	0	bonne	-
Maléique C ₄ H ₂ O ₃	40	150	2730	2	-7	-	-
Dichloromaléi- que C ₄ Cl ₂ O ₃	40	170	2600	4	0	-	faible
Dodeceny lsucci- nique C ₁₆ H ₁₆ O ₃	80	155	1000	0	0	-	-
Hexahydrophtha- lique C ₈ H ₁₀ O ₃	62	112	1285	0	-04	-	bonne

Tableau III

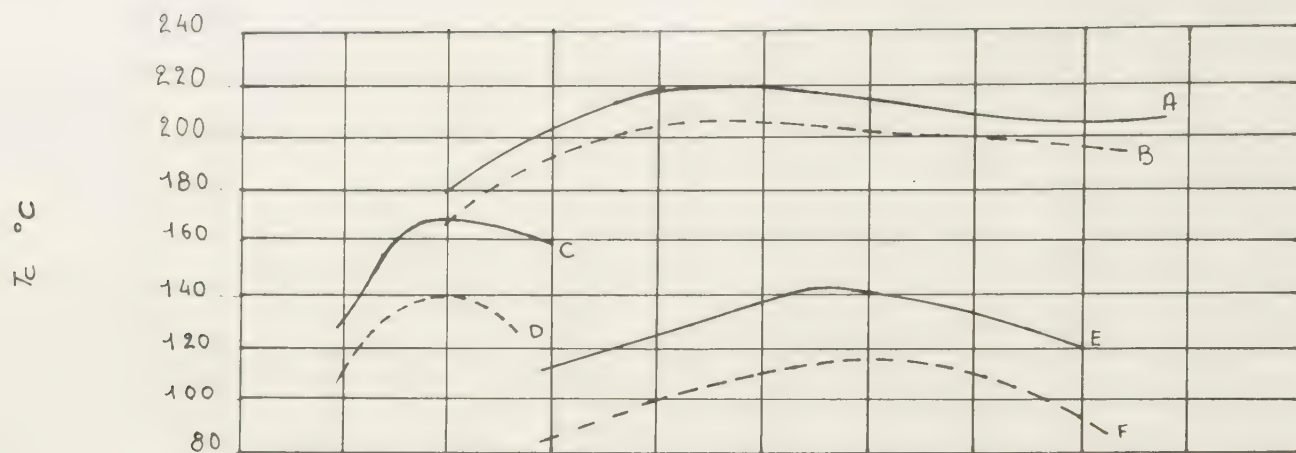
* Ceci est une échelle relative de 0 à 5 ou 0 indique une faible réaction exothermique et 5 une réaction fortement exothermique qui rend le moulage de grandes pièces impossible.

La Fig. 17 montre pour l'araldite 6020 et la bakélite ERL 2774 les variations de T_C, f et Q en fonction du pp de différents anhydres.

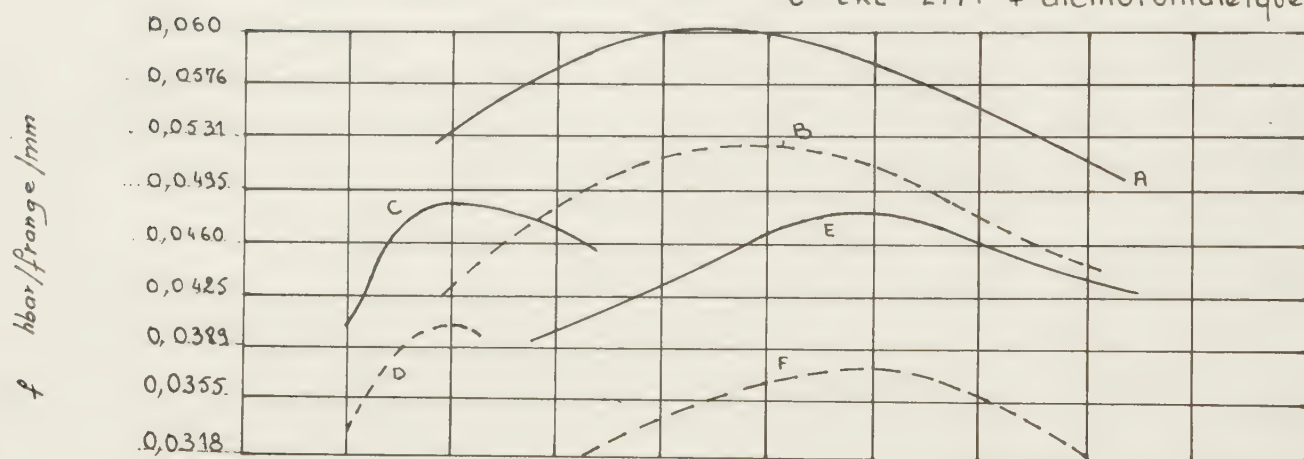
2.1.3. Effets et propriétés de l'anhydride phtalique C₈ H₄ O₃

La Fig. 18 montre en fonction du p.p d'anhydride phtalique, les variations de la température critique T_C, de la valeur de frange f et du facteur de qualité Q, des trois résines suivantes : araldite 6020, bakélite ERL 2774 et l'hysol 2030.

.../...



A ERL 2774 + chlorendique
 B Araldite 6020 + chlorendique
 C ERL 2774 + dichloromaleique



D Araldite 6020 + Maleique

E ERL 2774 + Nadique

F ERL 2774 + Dodecenyl Succinique

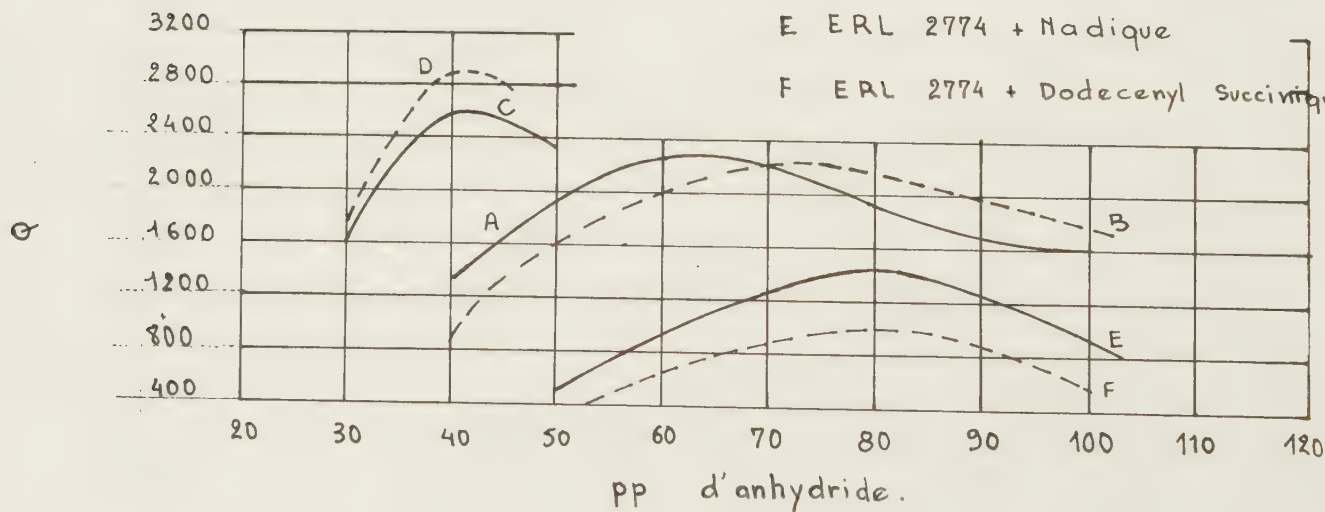
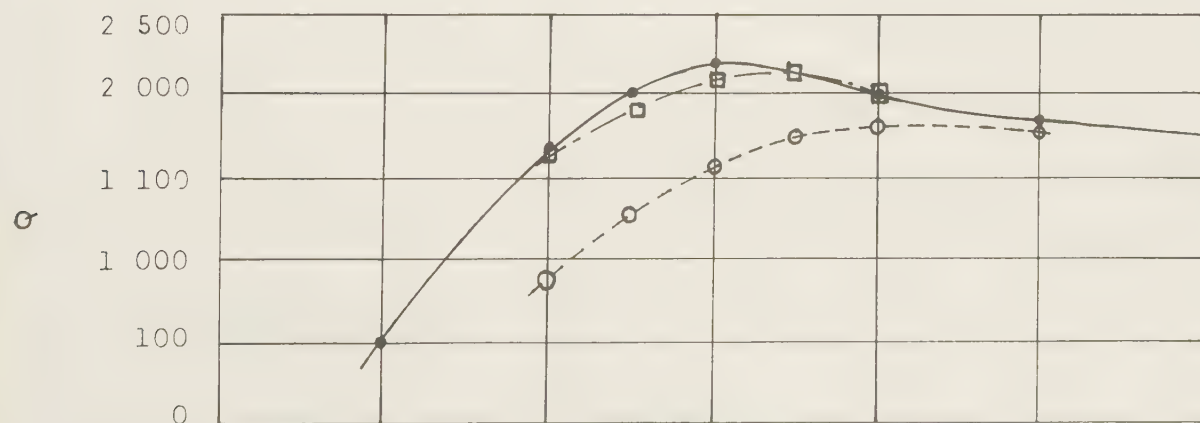
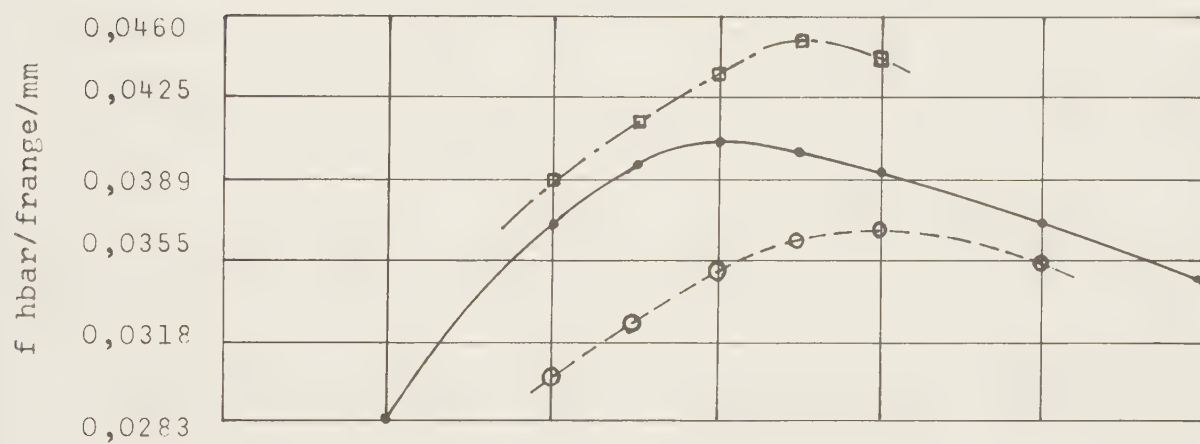
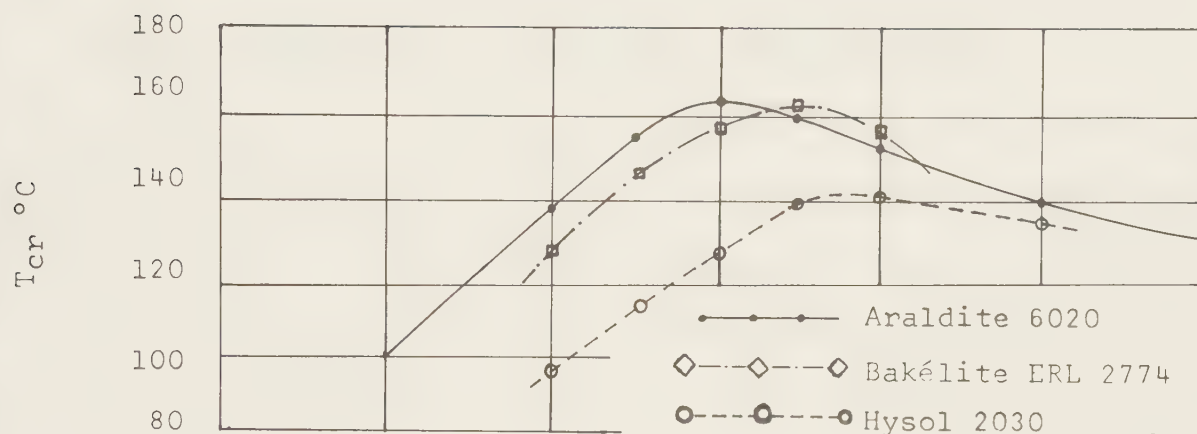


Fig 17.

Fig. 18



pp. d'anhydride phtalique

La valeur maximum du facteur de qualité de l'araldite 6020 est obtenue pour 50 pp d'anhydride phtalique tandis que pour l'ERL 2774 et l'hysol 2030 les maximums se situent respectivement entre 55 et 60 pp.

2.1.4. Utilisation de l'anhydride hexahydrophthalique et de l'anhydride phtalique comme agent durcisseur

L'addition d'anhydride hexahydrophthalique dans l'anhydride phtalique donne une résine de qualité supérieure. La réaction exothermique est considérablement réduite, ainsi que le temps de polymérisation, d'où une diminution des contraintes résiduelles.

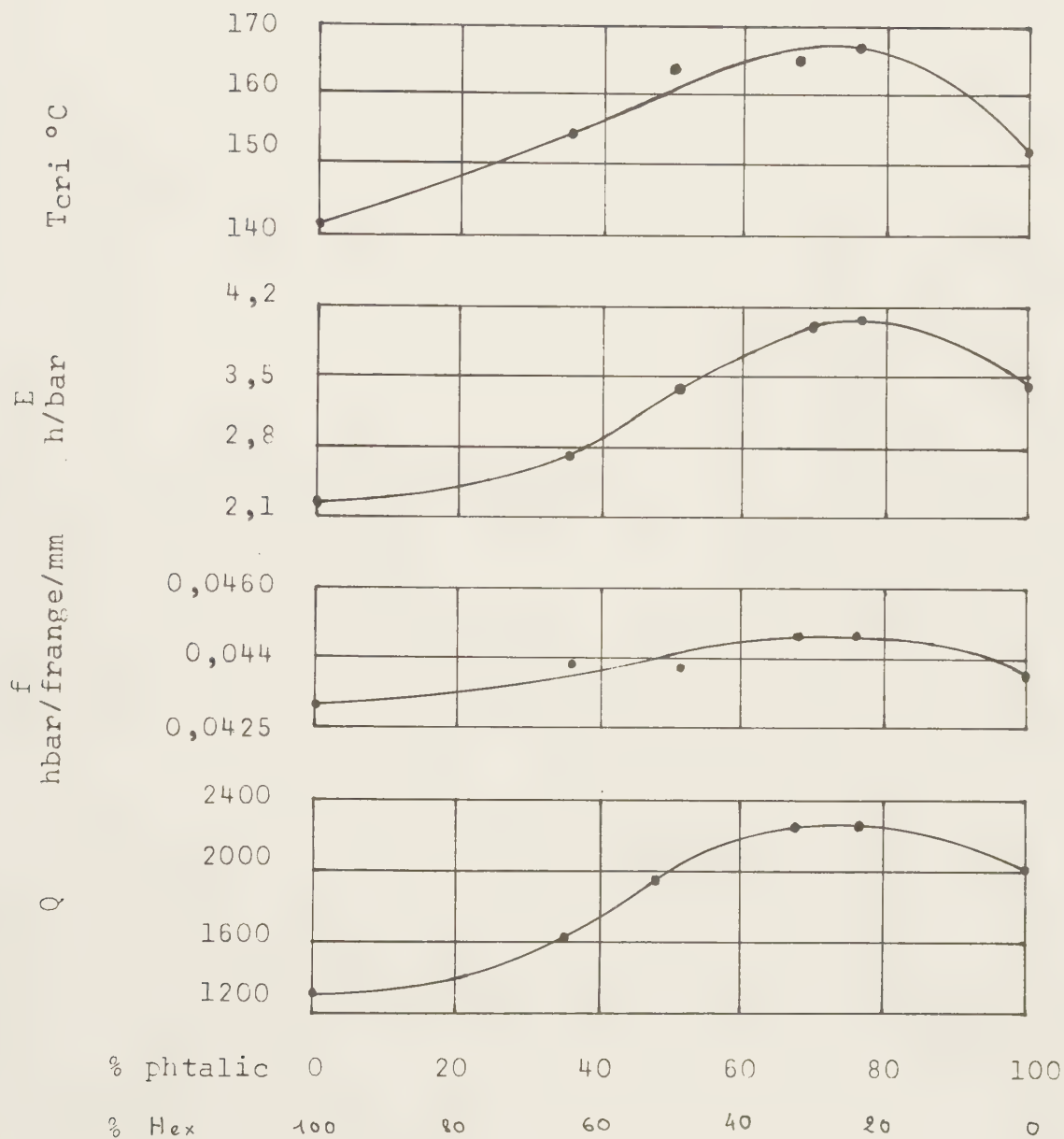
La Fig. 19 montre la variation des propriétés de l'ERL 2774 en fonction des pourcentages d'anhydride. La valeur maximum du facteur de qualité Q est obtenue pour 62 pp d'anhydride, le pourcentage de l'anhydride hexahydrophthalic étant de l'ordre de 25 %. On utilisera donc une résine dont la composition est la suivante :

100 pp.	ERL 2774
42 pp.	anhydride phtalique ($C_8 H_4 O_3$)
20 pp.	" hexahydrophthalique ($C_8 H_{10} O_3$)

Ce matériau porte le nom d'epoxy standard hexaphthalique.

Après une période de 5 ans, les variations suivantes ont été observées :

	<u>Origine</u>	<u>5 ans après</u>
Tcr	162	170°C
E	3,61	4,55 hbar
f	0,044	0,0505 hbar/frange/mm
q	2100	2450



Total d'anhydride 62 pp.

Fig. 19

2.1.5. Préparation des résines epoxy avec de l'amine
comme agent durcisseur.

Le tableau IV montre les propriétés de quelques
résines utilisant les amines comme agent durcisseur.

Amine	tt d'amine:	Epoxy	Température critique	E hbar	Q	effet de bord france/mm
pyrolidine DPI	10	ERL 2774	100	0,7	900	-0,06
diethylenetriamine DPI	10	ERL 2774	135	3,2	2770	-0,25
triethylene Tetramine:	9	Araldite 6020:	125	0,94	900	-0,29
EC 1	15	Epiphen 823	95	2,73	2075	-0,08
activator J	40	Armstrong C-6:	100	1,82	1650	+0,21
dimethylaminopropyla-	:	:	:	:	:	:
mine	10	ERL 2774	95	2,45	2750	-0,08
metaphenylenediamine	15	ERL 2774	175	2,95	3800	-0,22
,P' METHYLEnediani-	:	:	:	:	:	:
line	24	ERL 2774	165	2,70	2750	-0,24
T 15	14	ERL 2774	160	3,70	2200	-0,07
T 17	12	ERL 2774	160	4,55	2450	-0,07
T 17	7,5	Araldite 6020:	160	4,75	2750	-0,19
.E.A.B.	4,5	Araldite 6020:	200	6,45	2750	-0,19
diethanolamine	10	ERL 2774	105	1,89	2700	-0,12
metaphenylenediamine	15	ERL 2774	135	2,52	3400	-0,14
:	:	:	:	:	:	:

Tableau IV

La Figure 20 montre la variation des propriétés
de l'E.R.L. 2774 et de l'araldite 6020 préparées avec les amines
QT15, WT17 et TEAB.

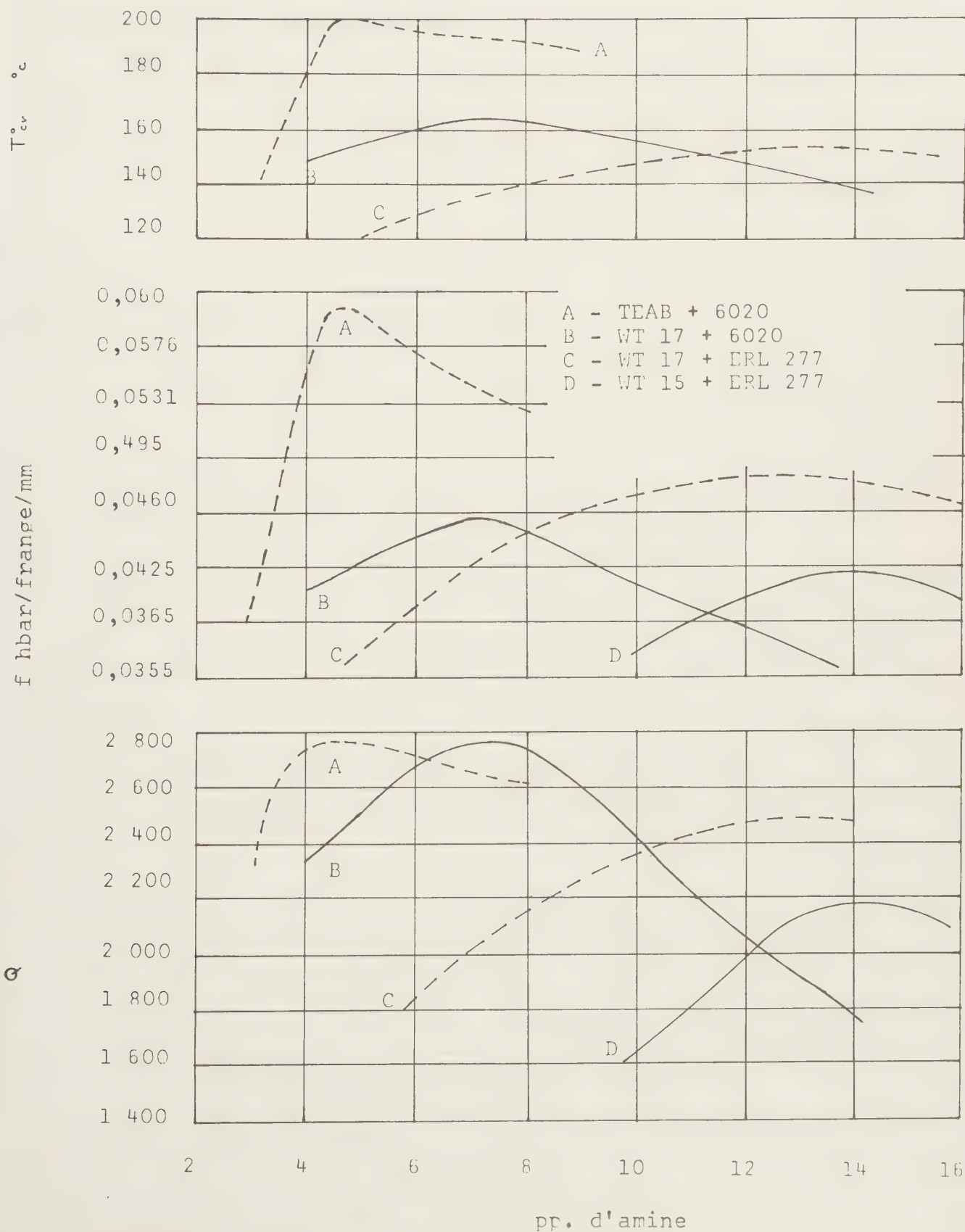


Fig. 20

2.1.6. Comportement viscoélastique des résines epoxy

La Fig. 21 montre la variation de la valeur de frange f à la température ambiante en fonction du temps de charge de la résine epoxy standard (100 pp. ERL 2774 42 pp. anhydride phthalique, 20 pp. anhydride hexahydrophthalic)

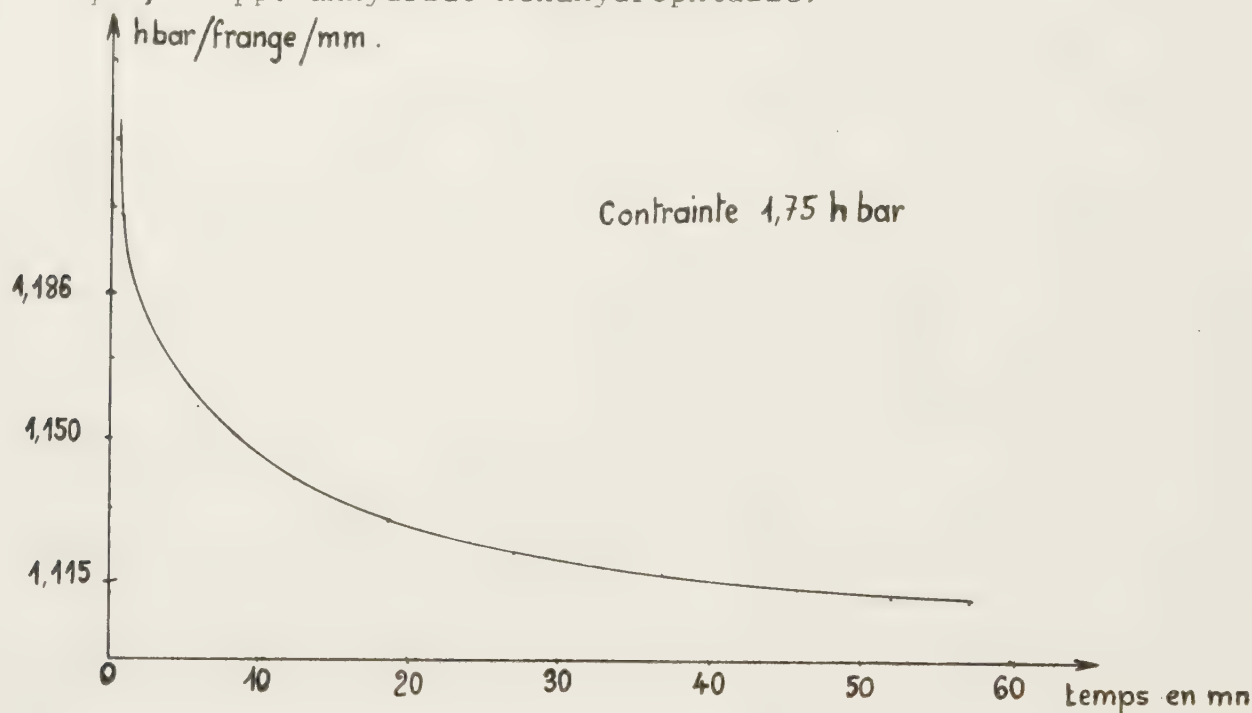


Fig. 21

A la température ambiante le fluage "optique" est d'environ 12 %. Le maximum de ce fluage se produisant dans la première heure.

2.1.7. Comparaison des propriétés photoélastiques de certaines résines à la température critique et à la température ambiante.

Matériaux	Température critique			Température ambiante 1/2 heure après changement			
	Temp	E	f	Q	E	f	Q
	°C	hbar	hbar/fr/mm	hbar	hbar	hbar/f/mm	
Troien	80	0,87	0,053	415	----	-----	-----
Catalin 61-893	110	0,77	0,0565	380	430,5	1,52	7 160
P'osterite	87	1,62	0,0680	600	----	-----	-----
Kriston	134	9,7	0,11	2200	359,8	1,4	6 850
Castolite	118	2,85	0,146	490	493,5	2,8	4 450
Photostress "S"	90	2,22	0,028	1990	332,5	1,77	4 750
ERL 2774 (50 pp phtalic)	160	3,65	0,044	2100	332,5	1	8 200
Ciba 6020 (50 pp phtalic)	162	3,56	0,041	2200	315	1	7 730
Standard Hex-Phtalic	170	4,5	0,047	2400	332,5	1,1	7 540

Tableau V

2.2.Travaux de Messieurs FROCHT et HUI PIH [7]

2.2.1. Généralités

Tous deux ont étudié les propriétés de la castolite.
L'agent durcisseur étant un monomère.

Les propriétés générales de ce matériaux d'essai
sont les suivantes :

.../...

- Il est figeable

- Il est possible de réaliser des modèles en plusieurs morceaux et de les assembler parfaitement à l'aide d'une colle à base de castolite. Ce collage n'amenant à peu près aucune distorsion dans les franges figées.

- La température de polymérisation est de 95°C

- La castolite est également un matériau stable dans le temps, ce qui permettra un temps d'analyse assez grand.

- Les contraintes thermiques sont relativement faibles.

2.2.2. Préparation

Afin d'éviter le plus possible les contraintes thermiques, on respectera le cycle de polymérisation suivant : on élève jusqu'à 95°C la température du mélange, cette élévation s'effectuant à la vitesse de 1,5°C par heure. On maintient ensuite à 95°C pendant 2 heures (temps de polymérisation) puis on refroidit lentement jusqu'à l'ambiante à la vitesse de 1,5°C.

Le modèle pourra ensuite être usiné.

2.2.3. Propriétés essentielles de la castolite

Ces propriétés sont résumées dans le Tableau VI (ci-dessous)

	f hbar/n/mm	E hbar	Q	σ	T _c °C
Temp. ambiante	2,8	494	4.460	0,355	
Temp. critique	0,142	2,8	490	0,5	118°C

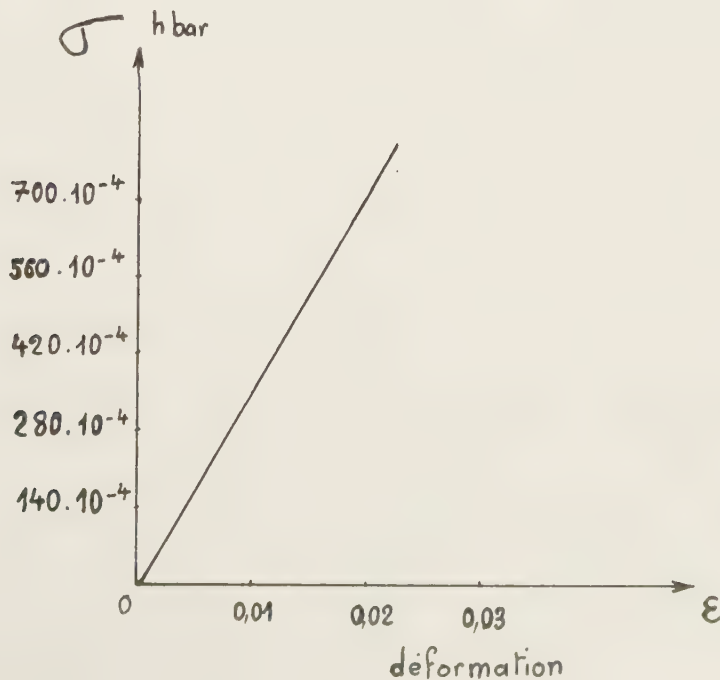
2.2.4. Constance de la valeur de frange f

Il suffit de vérifier en traction la validité de l'équation $\sigma = \frac{nf}{t}$

La Fig. 22 donne le résultat de cet essai



La Fig. 23 montre que la relation contrainte-déformation est linéaire à la température critique dans le cas de la traction.



2.3. Travaux de Messieurs J. D'AGOSTINO, D.C. DRUCKER,
C.K. LIU et MYLONAS 8

Leurs travaux ont porté sur les résines Armstrong C-1, C-2, C-4, C-6, C-9, C-14 ainsi que les araldites CN 501 et CN 502.

Leurs résultats sont donnés sous la forme du tableau VII.

Tableau VII

Matériaux	T°C	indice n	R	hbar E	f hbar	CE mm/n.
			7.930	316	1	43
CN 501	25	1,605	7.850	235	0,95	43
	38		7.120	250	0,87	480
	71		1.650	15	0,023	230
	128		1.690	1,54	0,023	228
	134					
C.N 502 préparé à chaud	27	1,617	313	1,12	52	6.420
	200		0,56	0,025	660	570
	110		0,581	0,025	660	590
	125		0,609	0,265	660	580
CN 502 préparé à froid	24	1,610	5.220	273	1,31	66
	38		5040	231	1,17	69
	100		1310	1,27	0,0248	293
	110		1280	1,25	0,0248	293
	125		1360	1,33	0,0248	282
	130		1340	1,32	0,0248	290
C.1	26	1,605	5000	310	1,59	69
	38		5000	300	1,50	69
	100		1.450	1,84	0,032	270
	117		1600	1,91	0,030	236
	125		1.410	1,88	0,034	275
C.2	24	1,656	8400	435	1,31	41
	100		1910	2,1	0,0283	200
	110		2250	2,51	0,0283	168
	125		2.350	2,46	0,0265	160

C 4	19	1,547	5.440	325	1,5	63,5
	100		1.780	2	0,0283	208
	117		1.790	2,1	0,0300	211
	125		1780	2,1	0,0300	211
	130		1870	2,2	0,0300	203
C. 6	20	1,655	6.800	333	1,24	52
	43		6.120	280	1,25	56
	100		1.750	1,96	0,0283	212
	127		1750	2,08	0,0300	212
	125		1800	2,1	0,0300	210
	130		1760	2,2	0,0320	216
C 9	25	1,595	5.840	356	1,54	58,5
	100		780	0,69	} 0,0212.	47,2
	110		850	0,71		445
	123		930	0,78		410
C. 14	25	1,556	3950	290	1,86	86,5
	38		3640	224	1,56	94
	100		1090	1,53	0,0354	345
	110		1070	1,50	0,0354	345
	125		1120	1,48	0,0336	330

De toutes ces résines trois d'entre elles possèdent des qualités supérieures aux autres, ce sont par ordre préférentielle : la C-2, la C-4, la C-6. Ces trois résines possèdent le facteur de qualité le plus élevé.

2.4. Travaux de Messieurs A. SAN MIGUEL et E.N. DURAN

Cette étude a porté sur les matériaux biréfringents à faible module d'Young. Ces matériaux qui sont à base d'uréthane sont le JPL-H, le solithane 113 et l'hysol. Chimiquement, un méthane est le produit de la réaction d'un isocyanate avec un hydroxyl.

Les Tableaux VIII, IX, X résument les propriétés de ces trois matériaux.

.../...

	N°	ν	E hbar	$c \times 10^{-9}$ $c \times 10^{-2}$ hbar/mm ² -1	K	Atmosphère heure/temps.°C
Hysol 2085 100 pp.	H ₁	0,48	0,161	3,5	0,0039	G;1,5/135
						G;3,5/100
+	H ₁ ^c	0,48	0,343	2,86	0,0065	G;1,5/135
						G;3,5/100
Hysol 3562 24 pp	H ₂	0,40	0,266	2,93	0,0054	H;5/120
	H ₂ ^c	0,48	0,488	2,86	0,0086	H;5/120
	H ₃	0,47	0,406	2,93	0,0082	G;1,8/135
						G;4/100
	H ₄	0,48	0,360	2,87	0,0068	G;1,5/140-G;4/100
	H ₅	0,40	0,371	2,93	0,0078	F;5,6/RT F;17/100
Hysol 2085 100pp.	H ₆	0,45	0,014	12,3	0,0012	E;15/130-E;4/105
+						
	H ₇	0,45	0,014	12	0,0012	G;1,5/130-G;4/105
DB 83pp.	H ₈	0,44	0,014	11,4	0,0010	H;1,5/135
Hysol 4485	H ₉	0,47	0,91	1,42	0,0085	H;4/100

Tableau VIII

.../...

E étanche. N azote V vide W air

C mesure effectuée trois jours après l'essai.

N°	b	E hbar	C x 10 ⁻² [hbar/r ²]-1	K	Atmosphère heure/température °C

		Estane 94,25 pp TDA 1,57 pp - PPG 13,23 pp			
JPL-H ₄	0,39	0,245	1,12	0,002	G 70/110
JPL-H ₅	0,44	0,260	1,07	0,002	G 18/120-52/110
JPL-H ₆	0,42	0,112	1,93	0,001	G 4/120-65,5/110
JPL-H ₇	0,49	0,14	1,2	0,001	G 19/104-64/105
JPL-H ₉	0,47	0,182	0,94	0,001	G 2,5/180-68,5/110
JPL-H ₁₀	0,43	0,175	0,94	0,001	G 4/116-66/112
JPL-H ₁₂	0,42	0,145	2	0,002	F 70/104
JPL-H ₁₃	0,49	0,315	1	0,002	F 70/104
JPL-H ₁₄	0,41	0,175	0,85	0,001	F 71/110
JPL-H ₁₅	0,47	0,175	0,83	0,001	G 71/110
JPL-H ₁₉	0,42	0,140	0,80	0,0008	F 22/RT G 51/110
		Estane 94,28 pp TDA + PPG = 14,90 pp			
JPL-H ₁₆	0,44	0,168	0,73	0,0008	G 72/110
JPL-H ₁₇	0,44	0,215	0,85	0,001	G 72/107
JPL-H ₁₈	0,40	0,206	0,85	0,001	F 72/RT H 51/105
		Estane 94,28 pp TDA + PPG = 14,95 pp			
JPL-H ₈	0,45	0,225	0,93	0,001	G 70/110
		Estane 94,28 pp TDA + PPG = 15,12 pp			
JPL-H ₁₁	0,48	0,315	0,99	0,002	G 70/107
		Estane 70,90 pp TDA + PPG = 11,47 pp			
JPL-H ₂₀	0,43	0,190	0,8	0,010	G 70/110

Tableau IX

N°	U	E hbar	C x 10 ⁻² hbar/mm ² -1	K	Durcisseur pp	Atmosphère heure/température °C
S-1	: 0,43	: 0,375	: 3,22	: 0,0025	SA 73,5	: H 1/150
S-2	: 0,46	: 0,420	: 3,35	: 0,0098	SA 73,8	: G 1/150
S-3	: 0,48	: 0,392	: 3,44	: 0,0091	SA 72,5	: F 1,25/125
S-3 _c	: 0,45	: 0,420	: 3,30	: 0,0096	SA 72,5	: F 1,25/125
S-4	: 0,48	: 0,475	: 3,14	: 0,0110	SA 72,5	: F 2/RT-G 0,5/115
S-5	: 0,43	: 0,320	: 3,30	: 0,0073	SA 74	: G 1/150
S-6	: 0,41	: 0,300	: 3,72	: 0,0073	SA 74,5	: E 4/150
S-7	: 0,49	: 0,320	: 3,30	: 0,0071	SB 70,5	: G 1/140
S-7 _c	: 0,46	: 0,460	: 3,14	: 0,0101	SB 70,5	: G 1/140
S-8	: 0,48	: 0,105	: 3,65	: 0,0025	SB 137	: G 0,75/150
S-8 _c	: 0,46	: 0,108	: 3,35	: 0,0025	SB 137	: G 0,75/150
S-9	: 0,46	: 0,115	: 3,50	: 0,0028	SB 130	: G 1,25/125
S-9 _c	: 0,48	: 0,120	: 3,58	: 0,0029	SB 130	: G 1,25/125
S-10	: 0,48	: 0,122	: 3,42	: 0,0027	SB 130	: G 1,25/110
S-11	: 0,47	: 0,101	: 4,20	: 0,0030	SB 130	: H 1/RT H 1/130
S-11 _c	: 0,48	: 0,133	: 3,20	: 0,0029	SB 130	: H 1/RT H 1/130
S-12	: 0,41	: 0,028	: 2,30	: 0,0004	SB 69	: G 4/150 G 155/130 G 20/110
S-12 _c	: 0,48	: 0,133	: 2,15	: 0,0020	SC 69	: G 4/150 G 155/130 G 20/110
S-13	: 0,41	: 0,035	: 2,20	: 0,0006	SD 67,5	: G 3,5/160 G 16/115
S-13 _c	: 0,45	: 0,175	: 2,20	: 0,0026	SD 67,5	: G 3,5/160 G 16/115
S-14	: 0,47	: 0,056	: 3,58	: 0,0012	SA 150	: G 1,5/150
S-15	: 0,46	: 0,350	: 3,22	: 0,0077	SA 73,7	: G 3/140
S-16	: 0,48	: 0,310	: 3,30	: 0,0067	SA 73,7	: H 3/140
S-17	: 0,44	: 0,021	: 13,2	: 0,0018	SB 140,5	: E 1/135
S-18	: 0,46	: 0,021	: 13,2	: 0,0018	SB 140,5	: G 1/135
S-19	: 0,47	: 0,024	: 12,5	: 0,0022	SB 134	: H 1/155
S-20	: 0,44	: 0,024	: 12,5	: 0,0022	SB 134	: H 2/RT 16/00

SA = Solithane 300

SB = DB castorial

SC = LHT 34

SD =

E étanche

F azote

G vide

H air

RT température ambiante

La préparation de ces résines ne se fait pas sous atmosphère ambiante, mais sous l'action d'un gaz. Ceci est dû au fait que le groupe isocyanate réagit violemment avec la teneur en eau contenue dans l'air ambiant.

2.5. Travaux de M. Robert Sampson [9]

Le matériau biréfringent étudié est un mélange de deux résines et d'un agent durcisseur. Les résines utilisées sont la bakélite ERL 2774 et ERL 2795, l'agent durcisseur étant la bakélite ZZL0803.

La composition du mélange est la suivante :

bakélite ERL 2774	50 pp
2795	50 pp
ZZL0803	

Les propriétés photoélastiques de cette résine sont les suivantes :

E = module d'Young 1,20 - 1,4 hbar/mm²

f = valeur de frange à T_c 0,0256 - 0,266 hbar/mm²/n/mm

T_c = température critique 74 - 79°C

ν = coefficient de Poisson 0,485 - 0,495

f valeur de frange à l'ambiante 1,38 - 1,54 hbar/mm²/n/mm

3 - TRAVAUX EFFECTUES AU LABORATOIRE DE RESISTANCE DES MATERIAUX DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE MECANIQUE DE NANTES

3.1. Généralités

Lorsqu'on désire figer des contraintes, il est nécessaire de choisir un matériau présentant de nombreuses qualités :

- Facteur de qualité élevé
- Absence d'effet de bord
- " de contraintes initiales
- Conservation de la biréfringence figée.

Etant donné qu'il n'existe pas de matériaux biréfringents présentant toutes ces qualités, il nous faudra choisir un matériau dont les qualités sont un compromis de celles énoncées plus haut.

Notre choix, suivant les conseils de Monsieur J.L. GUILLO, Ingénieur à la S.N.E.C.M.A., s'est porté sur l'araldite BCT 200, l'agent durcisseur étant le HT 901. Cette résine est commercialisée par la Société PROCHAL, 18 bis rue d'Anjou Paris 8e. C'est une résine époxy non modifiée à base de bisphénol A et d'épichlorhydrine. Elle se présente sous la forme solide, mais non définitivement durcie. Elle est de teinte jaune brun et peut être transformée en un produit infusible et insoluble grâce à l'adjonction d'un agent de durcissement.

3.1.1. Préparation du matériau

Solide à la température ambiante, l'araldite BC (T 200) se transforme par chauffage en une masse liquide et claire. Pour l'incorporation et la mise en solution du durcisseur HT 901, la

température de l'araldite doit être d'au moins 125°C. On porte donc l'araldite à 140°C et l'on ajoute lentement, en agitant continuellement, le durcisseur HT 901. Les proportions du mélange sont les suivantes :

Araldite BC (T 200)	100 pp
Durcisseur HT 901	30 pp

Le moule est placé au préalable dans une étuve portée à 120°C. La conception des moules de coulée doit permettre à la masse coulée de remplir les moules à partir de leur point le plus bas et à l'air qu'il contiennent de s'échapper par le point le plus élevé. C'est pourquoi, on place le moule en position inclinée pour la coulée. Cette méthode permet de couler des maquettes sous pression normale, sans formation de bulles. Il est parfois souhaitable, notamment dans le cas des moules présentant des contre-dépouilles de couler sous pression normale et de faire ensuite un rapide dégage sous pression réduite, sous une cloche à vide, par exemple. Mais le vide obtenu doit être inférieur à la tension de vapeur du durcisseur. A 120°C, cette tension de vapeur est de l'ordre de 7 à 8 mm de Hg. Si le moule est en acier, ou en aluminium, on le protégera à l'aide d'un agent démouleur. Par exemple, une graisse silicone SI₄ (SISS 10, Av. F. Roosevelt Paris 8e) On graisse abondamment le moule, et ensuite on essuie celui-ci à l'aide d'un chiffon propre. Il ne doit rester sur le moule qu'une couche minimum de graisse à peine visible.

La coulée effectuée, on maintient pendant 20 heures la température à 120°C afin que la polymérisation soit complète, puis on la fait décroître de 7°C par heure.

3.1.2. Exothermie de la réaction 10

La combinaison araldite BCT 200, durcisseur HT 901 se caractérise par une réaction relativement peu exothermique et un faible retrait au durcissement. L'exothermie de la réaction dépend de divers facteurs : quantité de matière coulée, température de polymérisation, forme et matériau constituant le moule.

Composition du mélange :

Araldite B (CT 200) 100 pp

HT 901 30 pp

Température de coulée et
température de l'étuve 120°C

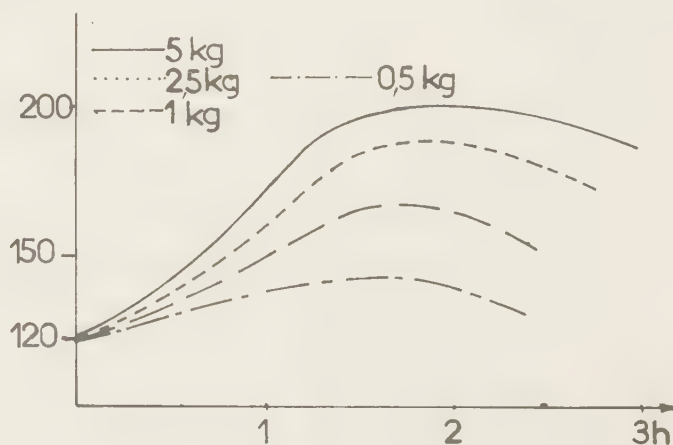


Fig. 24

Variation de l'exothermie de la réaction en fonction de la quantité de matière coulée.

Les Figures 24 et 25 donnent une représentation de l'exotherme de la réaction en fonction de la quantité coulée et de la température de durcissement. La température ne doit pas dépasser 120°C en début du durcissement, on évite ainsi, dans la mesure du possible, les fortes élévations de température au sein de la pièce moulée et, du même coup, l'apparition des contraintes internes

Relation entre l'exothermie de la masse et la température de polymérisation.

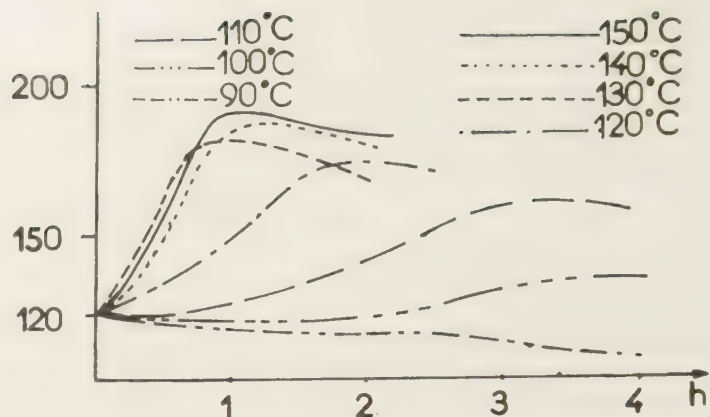


Fig. 25

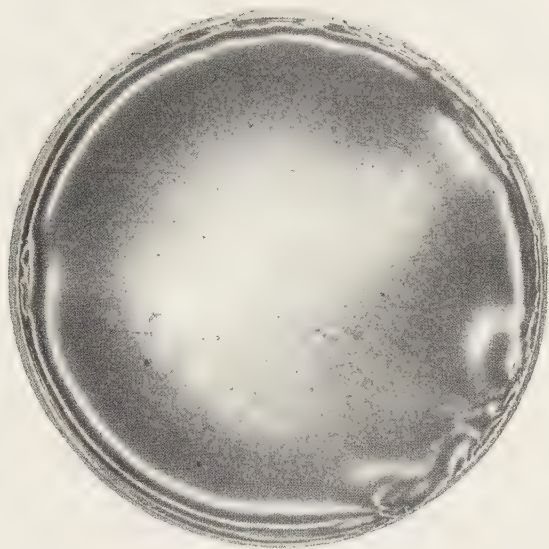
(Ces deux courbes nous ont été prêtées par la Société CIBA)

3.1.3. Traitement de relaxation

Il a pour but d'éliminer les contraintes internes qui sont dues principalement à deux causes. La première, nous l'avons vue est l'exothermie de la réaction de polymérisation. En effet, si l'on observe à travers un polariscope une maquette brute de coulée ou un disque par exemple (Fig. 26) il apparaît sur les bords des franges, ou une fraction de frange, ce qui dénote un état de contrainte.

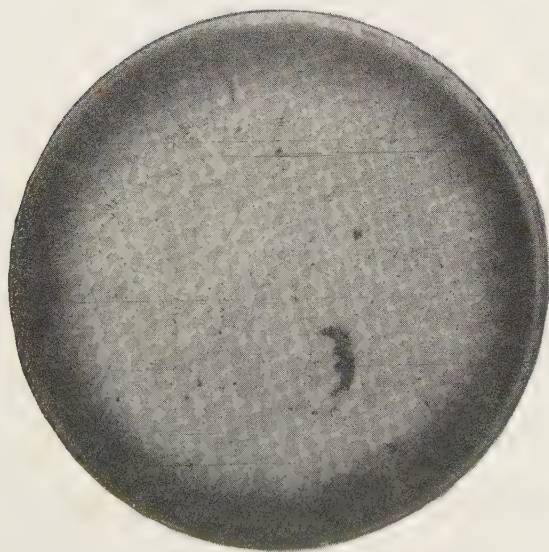
La deuxième de ces causes est l'usinage de la maquette. Là aussi on observe l'apparition de franges.

Dans les deux cas, ces franges nuiront à l'analyse photoélastique. On les élimine en faisant subir à la maquette un traitement de relaxation. Il consiste à élever la température de la maquette à la température critique, de maintenir celle-ci pendant une heure environ et de laisser décroître lentement la température de 7°C par heure. Il est facile de vérifier après un tel traitement l'absence de biréfringence (Fig. 27).



Disque inculaire
en araldite B
brut de coulée

Fig. 26



Le même disque ayant
subi un traitement de
relaxation.

Fig. 27

3.1.4. Détermination de la température critique de figeage

Comme exposé dans le §1.3.5.1, il sera nécessaire de déterminer la température critique dite température de figeage. C'est ainsi que si l'on soumet à température constante une éprouvette de traction, la biréfringence accidentelle (c'est-à-dire celle due aux effets mécaniques) du matériau variera en fonction du temps de chargement.

Nous définirons donc la température critique comme étant celle qui conservera constante la biréfringence en fonction du temps.

3.1.5. Mode opératoire

Pour déterminer cette température, l'éprouvette d'essai a été placée dans un récipient ayant deux faces parallèles transparentes, rempli d'huile silicone SI 200 (SISS, 10, Av. F. Roosevelt Paris 8e).

L'éprouvette dont nous voulons déterminer la biréfringence sera plongée dans ce récipient, ainsi que le système de mise en charge. L'ensemble étant porté en température à l'aide d'une résistance plongeante de 1 000 watts. Ce même ensemble étant asservi à une température bien déterminée, à l'aide d'un thermomètre à contact couplé à un relais.

Afin que la température soit la même dans tout le récipient, une circulation d'huile a été établie à l'aide de deux hélices. Un thermomètre de contrôle a également été plongé dans le bain, ce thermomètre donnant la température de référence. La mesure de la biréfringence a été effectuée en observant l'éprouvette à travers les parois transparentes du récipient.

.../...

Pour respecter le principe du figeage des contraintes, où l'on ne charge la maquette que lorsque celle-ci a atteint la température critique, nous ne chargerons l'éprouvette que lorsque sa température sera homogène. Le cycle thermique que nous utiliserons sera le suivant : la pièce est plangée dans le bain d'huile. Nous attendons que sa température soit homogène, c'est-à-dire, lorsque sa coloration est noire, couleur de l'isochrome d'ordre 0. Cette température étant atteinte, nous appliquons la charge (865 gr) ce qui a pour effet de soumettre l'éprouvette à un effort de traction pure. Commence alors une période d'observation. Celle-ci étant terminée, nous laisserons refroidir lentement la pièce. La vitesse de refroidissement étant de l'ordre de 7°C par heure.

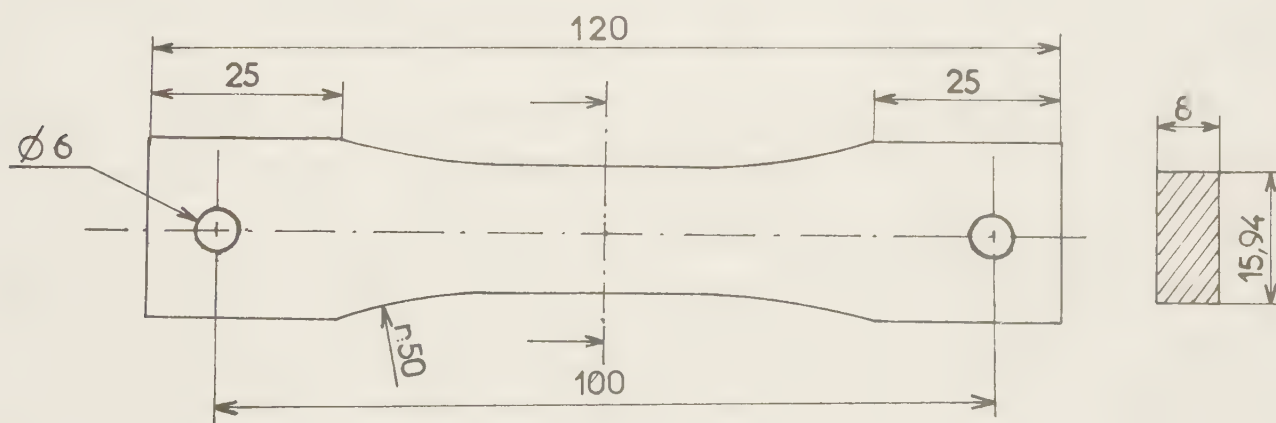


Fig. 30 Eprouvette d'essai

L'éprouvette a été taillée dans une plaque d'araldite coulée entre deux plaques d'acier chromé. Une fois l'éprouvette terminée, on lui fait subir un traitement de relaxation afin d'éliminer toutes les contraintes thermiques dues à la polymérisation, ainsi que les contraintes mécaniques dues à l'usinage.

3.1.6. Mesures

La plage de mesure sera comprise entre 100° et 140°C. En dessous de 100°, la biréfringence du matériau est très faible. La variation par rapport à la température ambiante est presque négligeable. Au-delà de 140°C, les caractéristiques mécaniques du matériau d'essai ont beaucoup trop évolué. Le coefficient de Poisson ν tend vers 0,5 ou, tout au moins, dépasse de beaucoup la valeur 0,4, alors que sa valeur à l'ambiante est de 0,35. On voit donc que le comportement de la maquette au point de vue déformation ne sera pas identique à celui de la pièce à étudier.

Dans l'étude photoélastique, il faudra donc faire très attention, car le réseau d'isochromes est certainement dû aux déformations. Il faut se souvenir que les matières plastiques sont composées de molécules partiellement polymérisées. Les molécules polymérisées paraissent former une structure en treillis s'étendant sur la totalité du matériau, tandis que les molécules non polymérisées remplissent les espaces du treillis et les propriétés physiques du matériau polymérisé sont différentes de celles du matériau non polymérisé [24]

En particulier, la température de fluage des molécules non polymérisées est beaucoup plus basse que celle des molécules polymérisées. Ainsi, si le matériau est chauffé jusqu'à ce point de fluage inférieur, le treillis des molécules polymérisées reste rigide et élastique tandis que le matériau compris dans les espaces du treillis devient visqueux et fluera sous l'action de la charge.

Au refroidissement, les zones non polymérisées se resolidifient dans leurs nouvelles positions et lorsque la charge est retirée, elles d'opposent dans une large mesure au redressement du treillis qui conserve donc une grande partie de la déformation que la charge avait communiquée. Le matériau possède un système de contraintes internes dû aux réactions entre les deux phases qui le constituent. En conclusion, les chargements devront être relativement faibles afin d'éviter de trop grandes déformations.

3.1.7. Détermination de la biréfringence

Nous rappelons que le retard relatif d'une lame d'épaisseur t soumise à deux contraintes normales principales et est donné par la formule (5)

$$R = R_1 - R_2 = (C_1 - C_2) (\sigma_I - \sigma_{II}) t = C (\sigma_I - \sigma_{II}) t = n \lambda$$

$$\sigma_I - \sigma_{II} = \frac{n \lambda}{t C} \quad \frac{\lambda}{C} = f$$

$$\sigma_I - \sigma_{II} = n \frac{f}{t}$$

$\sigma_I - \sigma_{II}$ étant la différence des contraintes principales

n l'ordre de frange

f la valeur de frange

t l'épaisseur de l'éprouvette.

La constante optique relative c a la dimension inverse d'une contrainte. Si on la chiffrait en hbar^{-1} , on aurait des nombres très petits ; il est donc plus simple de définir une unité plus appropriée. Cette unité est le brewster défini par :

$$1 \text{ brewster} = 10^{-5} \text{ hbar}^{-1}$$

Dans notre cas

$$\nabla_{II} = 0$$

$$\nabla_I = \frac{P}{S}$$

$$\frac{P}{S} = \frac{n\lambda}{ct}$$

$$\frac{P}{ht} = \frac{n\lambda}{ct}$$

$$c = \frac{n\lambda h}{P}$$

$$f = \frac{\lambda}{c} = \frac{P}{nh}$$

$$P = 865g$$

$$h = 15,94$$

La Fig. 29 montre une éprouvette d'étalonnage en traction simple.

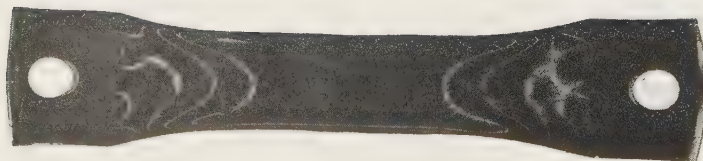


Fig. 29 Eprouvette de traction

3.1.8. Résultats

Tableau XI

Température de mise en charge °C	T E M P S											
	30 s.	1 mn.	2 mn.	3 mn.	4 mn.	5 mn.	6 mn.	7 mn.	10 mn.	15 mn.	20 mn.	25 mn.
	Nombre de franges observées											
115° C		0,28		1,02	1,12	1,19	1,25	1,30	1,34	1,38	1,39	1,40
120° C		1,47	1,53	1,55	1,56 ⁺	1,56 ⁺			1,56 ⁺	1,56 ⁺	1,57	
122° C		1,53	1,57	1,59	1,59 ⁺	1,60	1,60 ⁺		1,61		1,61	
127° C		1,59	1,60 ⁺	1,61		1,61					1,61	
129° C	1,60 ⁺	1,61				1,61					1,61	
130° C	1,61					1,61					1,61	
136° C		1,52	1,53								1,53	
145° C		1,50	1,51								1,51	
160° C		1,43	1,45								1,45	

De ces mesures, nous pouvons en déduire le tableau suivant :

Tableau XII

Temps de charge	° C	120°	122°	127°	129°	130°	136°	145°	160°
30 s.	f	4	3,93	3,76	3,37	3,37	3,58	3,62	3,90
	C	1465	1490	1560	1746	1746	1642	1625	1508
1 mn.	f	3,68	3,57	3,41	3,37	3,37	3,56	3,60	3,79
	C	1590	1650	1725	1746	1746	1652	1630	1546
2 mn.	f	3,55	3,46	3,38	3,37	3,37	3,55	3,59	3,74
	C	1658	1700	1741	1746	1746	1658	1640	1575
5 mn.	f	3,46	3,39	3,37	3,37	3,37	3,54	3,59	3,74
	C	1700	1736	1746	1746	1746	1662	1640	1575

f étant donnée en 10^{-2} Kp/mm² par frange par mm d'épaisseur

C en brewsters.

.../...

Muni de ces résultats, nous pouvons tracer les courbes de la variation de l'ordre de frange en fonction du temps, à température et charge constante (voir Fig. 30).

On remarque que lorsque la température s'élève, les courbes tendent à croître plus rapidement, ce qui signifie que le matériau atteint une même valeur de sa constante photoélastique en un temps de chargement plus court. La température critique sera donc celle qui nous donne la constante photoélastique la plus élevée en un temps le plus court. On note donc que la température critique de figeage pour le composé araldite B (100 pp) et le durcisseur H.T.901 (30 pp) est de 130° .

Si l'on poursuit ces expériences au-delà de 130° , on s'aperçoit que les courbes croissent rapidement mais que leur maximum est inférieur au maximum maximorum. Toutes ces mesures ont été faites pour de nombreuses températures. Nous n'avons relevé que les plus intéressantes afin de ne pas surcharger les courbes. On soulignera également qu'il est assez difficile de faire une mesure de la biréfringence dans la première minute. Le phénomène s'exerçant très vite et la mesure étant assez délicate à faire. Il faut un minimum de 15 secondes pour faire une mesure de biréfringence.

On a également tracé les courbes donnant la constante photoélastique C ainsi que celle donnant la valeur de frange (Figures 31 et 32). Ces courbes caractérisent mieux visuellement la température critique de figeage. En effet, nous voyons très bien

que la courbe 3, la valeur de frange minimale, c'est-à-dire, celle pour laquelle la variation de contrainte par mm² par frange par mm d'épaisseur est la plus faible, se situe à la température de 130°C. Nous rappelons que d'une façon générale, la relation fondamentale de la photoélasticité est :

$$\sigma_I - \sigma_{II} = \frac{nf}{t}$$

bien entendu ceci dans le cas d'un problème plan. La courbe 2 nous donne le même résultat.

A l'aide d'un cathétomètre, nous avons pu déterminer la valeur du module d'Young à 130°C.

$$E = 2,25 \text{ h bars}$$

Nous terminerons en donnant la valeur du coefficient de mérite $Q = \frac{E}{f}$ à 130°C.

$$Q = 25,4 \times \frac{1}{\lambda} \times 10^2 \times C \times E \quad (17)$$

$$E \text{ en h bars} \quad - \quad C \text{ en brewsters} \quad - \quad \lambda \text{ en } \overset{\circ}{\text{A}}$$

$$Q = 25,4 \times \frac{1}{5\,893} \times 10^2 \times 1\,746 \times 2,25 = 1\,700$$

$$Q = 1\,700$$

3.1.8.1. Calculs d'erreurs

Le calcul d'erreur sera fait pour la température critique de figeage.

$$C = \frac{n \lambda h}{P}$$

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta P}{P} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{1,61} + \frac{1 \cdot 10^{-2}}{15,94} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,865}$$

$$\frac{\Delta C}{C} = 14,2 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta C = 1746 \times 14,2 \cdot 10^{-3} = 25 \text{ brewsters}$$

$$\underline{1720 < C < 1771 \text{ brewsters}}$$

$$f = \frac{\lambda}{C}$$

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta C}{C} = 14,2 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta f = 10^{-2} \times 3,37 \times 14,2 \cdot 10^{-3} = 48 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/mm}^2 \text{ par frange par mm d'épaisseur}$$

$$\underline{3,42 \cdot 10^{-2} < f < 3,32 \cdot 10^{-2} \text{ Kg/mm}^2 \text{ par frange par mm d'épaisseur}}$$

$$\frac{\Delta Q}{q} = \frac{\Delta E}{E} + \frac{\Delta C}{C}$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}$$

$$\frac{\Delta E}{E} = 4,27 \cdot 10^{-2}$$

$$\frac{\Delta Q}{q} = 14,2 \cdot 10^{-3} + 4,27 \cdot 10^{-2} = 5,7 \cdot 10^{-2}$$

$$\Delta Q = 1700 \times 5,7 \cdot 10^{-2} = 100$$

$$\underline{1600 < Q < 1800}$$

3.1.9. Conclusion des mesures

On peut donc conclure de cette étude que la température critique de figeage de l'araldite B (100 pp) associée au durcisseur H.T.901 (30 pp) est $130^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, c'est-à-dire qu'il sera nécessaire de posséder une étuve qui permette une régulation du degré.

- Caractéristiques mécaniques et photoélastiques du matériau à la température ambiante et à la température de figeage.

Ambiante -

$$C = 30 \text{ brewsters}$$

$$f = 2 \text{ h bars par frange par mm d'épaisseur}$$

$$E = 160 \text{ h bars}$$

$$= 0,354$$

Température critique de figeage -

$$C = 1\,746 \text{ brewsters}$$

$$f = 3,37 \cdot 10^{-2} \text{ h bars par frange par mm d'épaisseur}$$

$$E = 2,25 \text{ h bars}$$

$$Q = 1\,700$$

montrent l'amélioration très importante de la précision obtenue en travaillant à la température de figeage (facteur d'amplification 50).

.../...

Variation de la biréfringence accidentelle C
en fonction de la température et du temps
de chargement

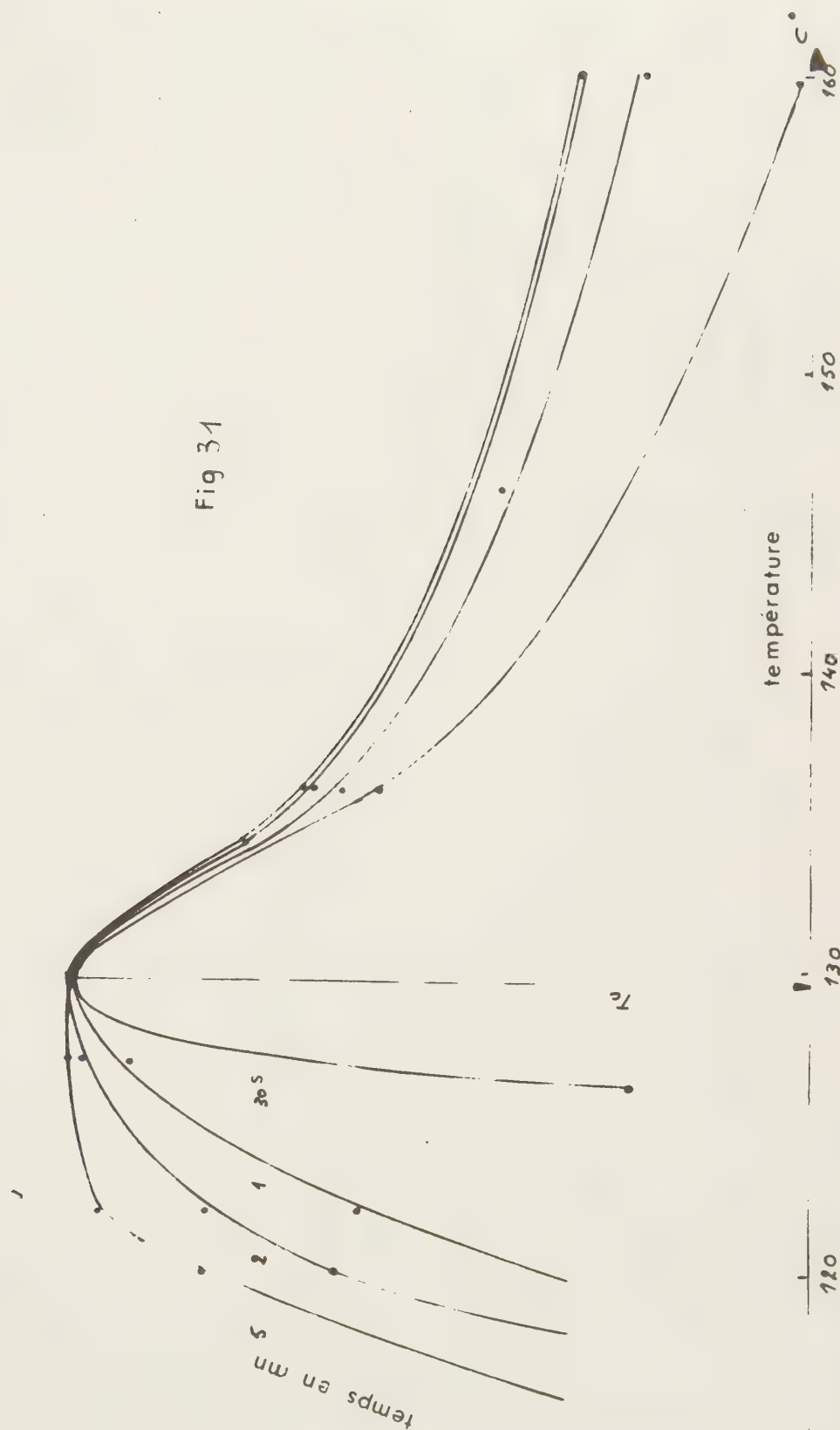


Fig 34

Variation de la valeur de frange f
en fonction de la température
et du temps de chargement



Fig 39

Kg/mm² / n / m d'épaisseur

3.2. - Moules

3.2.1. Généralités

Parfois, pour des raisons technologiques, il est impossible d'usiner une maquette dans son ensemble, mais il est possible de réaliser des collages. Ainsi, on pourra faire une analyse en tous points de la maquette excepté les points du joint de collage, car au voisinage de celui-ci une légère perturbation des franges existe.

On cherchera donc à réaliser la pièce brute de coulée. Dans ce cas, il est difficile de réaliser un moule en acier ou en aluminium.

Notre première idée a été de réaliser un moule en plâtre à partir d'une réplique en lucoflex du modèle. Nous avons fait une réplique en lucoflex, car il est facile de l'exécuter en plusieurs morceaux et de les souder entre eux ensuite. A l'aide d'un plâtre à mouler, nous avons réalisé un moule en plusieurs morceaux de cette réplique, nous l'avons placé dans l'étuve portée à 120°C et nous y avons coulé l'araldite. Ce mode opératoire a été un échec complet, échec car l'araldite a diffusé dans le plâtre poreux et nous n'avons jamais pu démouler la pièce.

L'idée suivante a donc été d'enduire sur le plâtre une fine couche de vernis. Nous avons employé un vernis utilisé par les mécaniciens dentistes. De nouveau, le résultat a été négatif, le vernis s'est décollé et l'araldite a de nouveau diffusé.

A ce stade, nous avons cherché un matériau stable pouvant remplacer le vernis. Nous avons choisi un élastomère R.T.V. (Rhône-Poulène - 22, Av. Montaigne Paris 8e) La encore, nous n'avons

.../...

pas réussi car jamais nous n'avons pu disposer une couche uniforme de R.T.V. sur la paroi du moule. Le démoulage a été possible mais les maquettes n'étaient pas conformes.

Après cette série d'échecs, nous avons abandonné cette voie, car aucune amélioration ne semblait pouvoir être apportée.

Nous avons eu alors l'idée de faire totalement le moule en élastomère. Le premier de ces élastomère employé a été la pate X5 (Rhône-Poulène, 21. Av. montaigne Paris 8e), mais là aussi le résultat n'a pas été satisfaisant. La pate X5 n'a pu supporter la température et le temps de polymérisation, elle s'est décomposée. On a donc cherché parmi les élastomères celui qui était susceptible de résister à la température et au temps de polymérisation. Notre choix s'est fixé sur le rhordorsil élastomère R.T.V. 10341. Ce R.T.V. supporte des températures de 200°C et de plus, il est transparent.

Le R.T.V. 10341 qui est liquide se transforme après adjonction d'un catalyseur en une masse souple et élastique. Afin qu'il résiste aux résines epoxy, on y ajoute une huile spéciale.

La composition du mélange est la suivante:

R.T.V. 10341 A	100 pp
" " B	10 pp
Huile 47.V 100.000 C	5 pp

La vulcanisation de ce mélange est fonction de la température, à l'ambiante, ce temps se situe entre 48 et 72 heures, il n'est plus que de 4 h à 50°C et seulement d'une heure à 100°C. La masse souple obtenue est anti-adhérente vis-à-vis des métaux et des matières plastiques.

.../...

3.2.2. Obtention du moule

Si l'on doit obtenir un modèle à une certaine échelle en araldite, on réalise en lucoflex, ou en tout autre matériau, une réplique à la même échelle. Le moule en R.T.V. sera tiré de cette réplique.

L'élastomère sera lui-même coulé dans un cylindre d'altuglass transparent. Cette manière d'agir présente de nombreux avantages. L'altuglass et le R.T.V étant transparents, on pourra suivre la vulcanisation, le cylindre d'altuglass fera fonction également de cloche à vide, il suffira d'y usiner deux gorges pour joint torique. La Fig. 35 illustre ce principe.

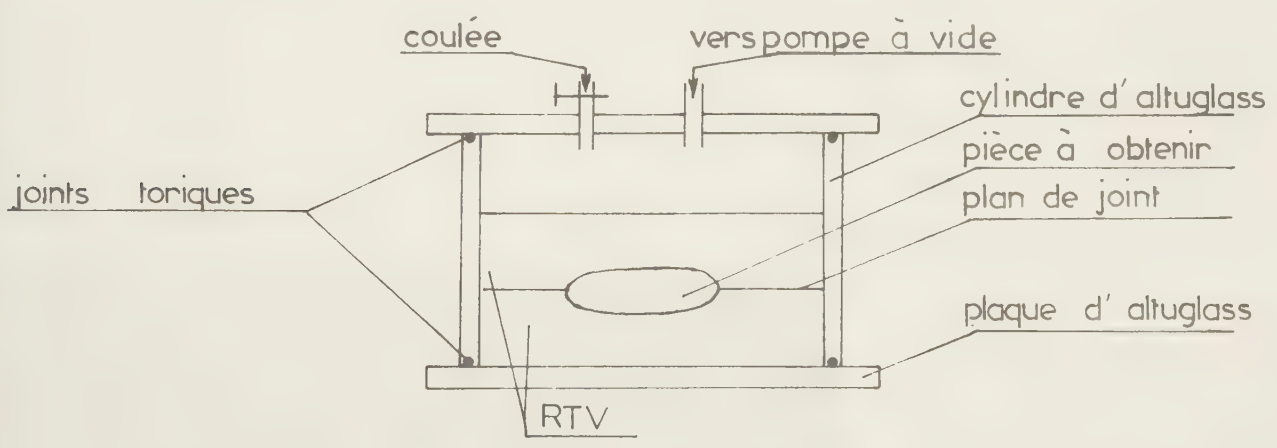


Figure 35

La réalisation de maquettes complexes nécessite la préparation d'un moule en plusieurs éléments. Il est alors nécessaire de prévoir des plans de joint. Ces plans de joint sont traités avec un vernis silicone SI 20 (Siss - 10, Av. F.D.Roosevelt Paris 8e)

Exemple : réalisation du moule d'un engrenage de $\varnothing$ ext. 100 mm et d'épaisseur $h = 20$ mm. L'épaisseur du voile étant plus faible que l'épaisseur de la denture.

Le cylindre d'altuglass reposant à l'aide d'un joint torique sur une semelle en altuglass, on coule une couche d'un centimètre de R.T.V. La vulcanisation étant faite, on pose l'engrenage (Fig. 36) après avoir enduit la couche vulcanisée de vernis silicone, et l'on coule en R.T.V. la partie A du moule. On dégaze pendant quelques instant afin que le R.T.V. épouse bien la forme de l'engrenage (Fig 37). Une fois le R.T.V. vulcanisé, on retourne l'ensemble formé de l'engrenage et de la dernière coulée de R.T.V. en l'induisant de vernis silicone (Fig. 38). On coule ensuite la partie B du moule (Fig. 39).

Pour faciliter le démoulage, on glisse quelques gouttes de vaseline entre le R.T.V. et l'engrenage. Les photos 40 et 41 illustrent cet exemple.



fig 36

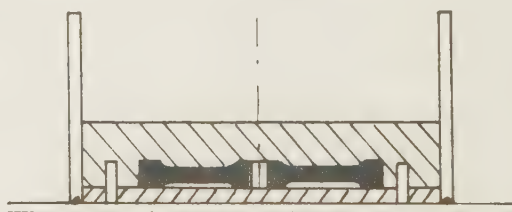


fig 37

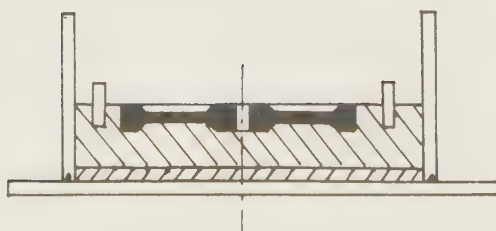


fig 38

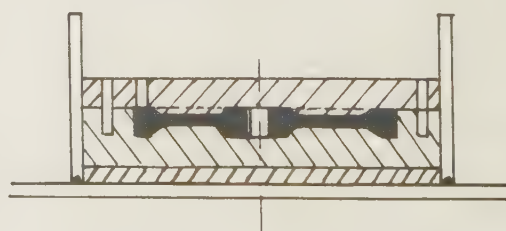


fig 39

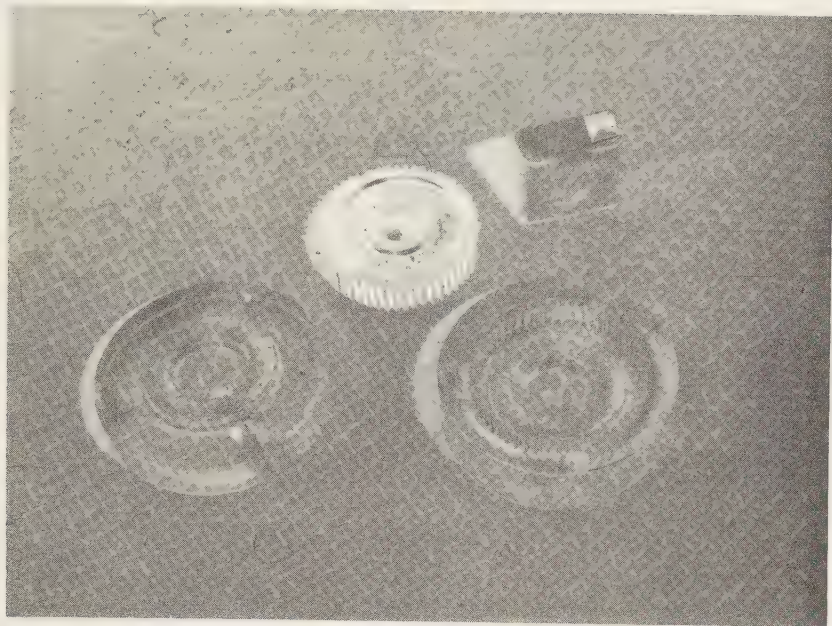


Fig. 40

Moule d'un engrenage
en RTV

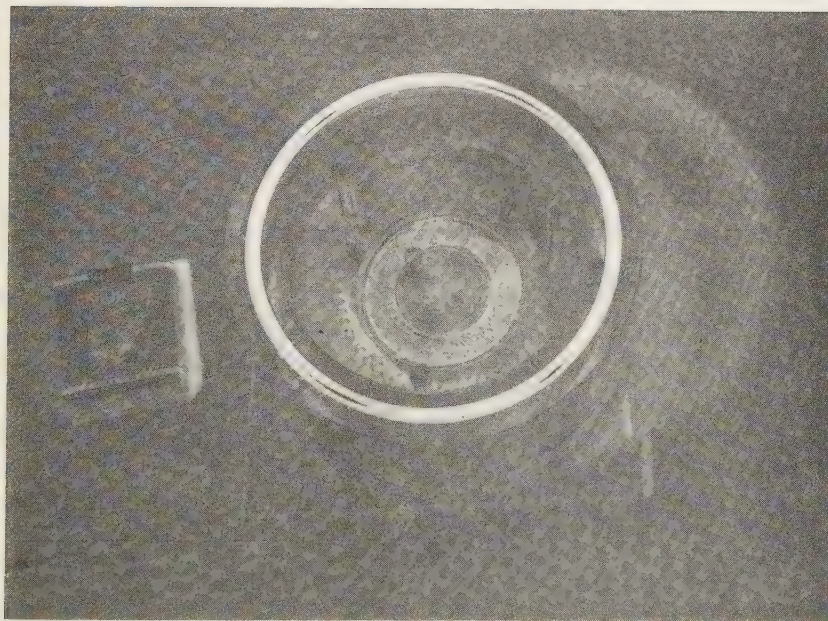


Fig. 41

L'ensemble du moule monté

3.3. - Figeage de la maquette

On place dans l'étuve la maquette et son dispositif de chargement, et on élève la température de l'ensemble jusqu'à 130°C, température critique de figeage.

Afin que la température de la maquette soit homogène, on maintient cette température pendant un certain temps, ce temps étant fonction de l'épaisseur de la maquette, en général, on considère une heure par centimètre d'épaisseur.

La température étant homogène, on charge la maquette en maintenant la température constante pendant une heure. Ensuite, nous laissons refroidir lentement la maquette sous charge. La vitesse de refroidissement ne devra pas être supérieure à 7°C par heure.

Les Fig. 42 et 43 représentent les isochromatique figés respectivement dans un disque circulaire soumis à une compression diamétrale et dans un disque circulaire soumis à trois charge radiales.

.../...

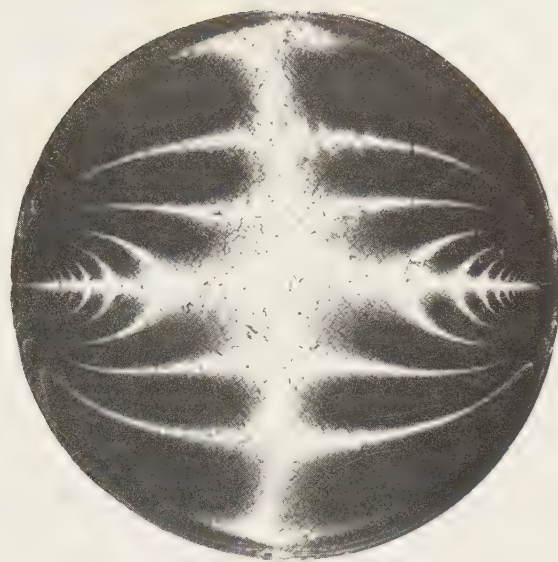


Fig. 42

Isocline dans un disque circulaire soumis à une compression suivant son diamètre horizontal. Les franges plus fines sont les isochromatiques figées.



Fig. 43

Disque circulaire soumis à trois charges radiales
Réseau des isochromatiques.

3.4. - Etude d'une coquille de condenseur (tubulures radiales)

3.4.1. Introduction

Cette étude a pour objet la détermination de la contrainte principale σ_t tangente à la surface dans les deux plans de symétrie de la coquille, appelés respectivement "plan de symétrie n° 1 et plan de symétrie n° 2" (Cf. Figures 1 et 2).

3.4.2; Description de la maquette

La maquette est exécutée à l'échelle 3/20 en araldite B (Fig. 3). Une maquette en lucoflex de même échelle a servi à réaliser un moule en élastomère R.T.V. 10.341. La maquette qui a été utilisée pour l'analyse a donc été obtenue brute de coulée. Seuls les deux trous d'hommes ont été usinés.

3.4.3. Essais

Pour essayer de respecter le mieux possible les conditions de similitude entre maquette et réel, la coquille a été assemblée à une plaque à tubes reproduisant à l'échelle 3/20 la plaque réelle.

Après détensionnement de la maquette, l'ensemble a été placé dans une enceinte chauffante à température programmée et relié à une source de pression, maintenant à l'intérieur de la coquille une pression constante d'air comprimé contrôlé par une soupape hydraulique (Fig. 4 et 5).

Après le cycle de température nécessaire au figeage, la maquette a été découpée selon les deux plans de symétrie pour

obtenir des tranches de faible épaisseur (quelques millimètres) soigneusement polies et observées ensuite au polariscope.

3.4.4. Résultats

L'étude au polariscope des isochromes et des isoclines a permis de tracer les différentes lignes caractérisant l'état de contraintes et figurant sur les photos jointes.

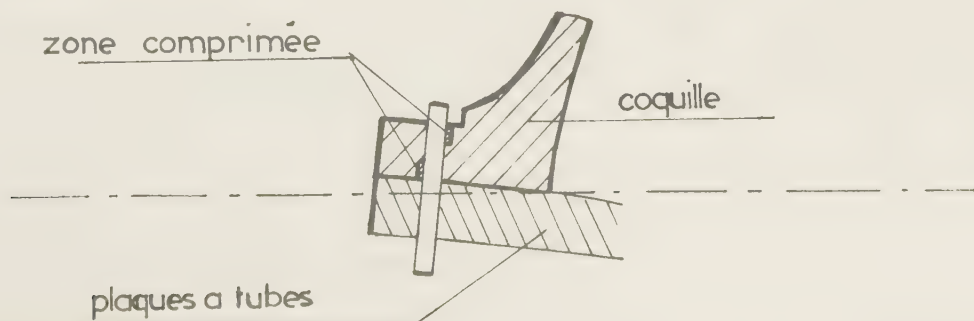
Les planches 4,5,6,7,8 donnent le réseau des isostatiques. Ces courbes nous permettent de déterminer directement le cheminement des contraintes à l'intérieur du modèle dans les deux plans de symétrie.

On observera sur la planche 8 un point attractif ainsi qu'un point répulsif.

Les courbes des planches 9,10,11,12,13 nous donnent la contrainte tangentielle τ_t à un coefficient multiplicateur près. Ce qui nous permet de calculer la majoration de contrainte entre deux points de la surface extérieure ou intérieure.

Nous avons tracé la courbe τ_t pour la surface interne et la surface externe. Les valeurs numériques obtenues sont écrites sur la ligne des abscisses en chaque point.

L'étude des contraintes dans les deux plans de symétrie a permis de déterminer immédiatement qu'il n'existe pas un encastrement parfait entre la plaque à tubes et la coquille. Il y a une légère rotation de l'ensemble.



-51-

Les deux zones observées montrent qu'il y a une rotation du corps du boulon de serrage. D'où deux zones comprimées latéralement par le fût du boulon.

On notera au passage que cette compression apparaît aussi sur le tracé des isostatiques (planches 4 et 5).

D'une manière générale, la contrainte maximale se trouve à la surface de la pièce. C'est ainsi, qu'ici, si l'on examine le plan de symétrie (1), on voit rapidement que la contrainte maximale sur la paroi interne de la coquille se situe dans la partie hémisphérique supérieure. Le taux de contrainte étant de l'ordre de 3,5 fois plus élevé que dans la partie hémisphérique moyenne de la coquille.

On remarquera que dans le plan de symétrie (1) nous n'avons pas de majoration de contraintes due aux formes.

Par contre, dans le plan de symétrie (2), il existe deux pics de contraintes dues aux formes de la pièce. Le premier, le plus important, est de l'ordre de 3,2. Il a lieu au raccordement du bossage et de la partie hémisphérique supérieure. Le second se trouve également au raccordement du bossage et de la partie hémisphérique. Son taux est plus faible 1,80.

Si l'on examine les planches 12 et 13, on voit que sur la surface extérieure la contrainte σ_t passe successivement de la traction à la compression et de nouveau en traction.

Nous pensons que ces variations de contraintes sont imputables à la forme du bossage. Une modification de la forme de ce dernier pourrait conduire à une contrainte de signe uniforme.

3.5. Etude d'une coquille de condenseur (tubulures longitudinales).

3.5.1. But

Détermination de la contrainte principale tangente à la surface dans les deux plans de symétrie n° 1A et phase de symétrie n° 2A.

La maquette est également exécutée à l'échelle 3/20 en araldite B. Elle a subi le même cycle de détensionnement et de figeage que la coquille à tubulures radiales.

3.5.2. Résultats

Comme dans l'analyse précédente, il existe deux pics de contraintes dans le plan de symétrie n° 2A. Le premier a lieu au raccordement du bossage et de la partie hémisphérique supérieure, le second se trouve également au raccordement du bossage et de la partie hémisphérique. Tous ces résultats sont résumés sur les figures

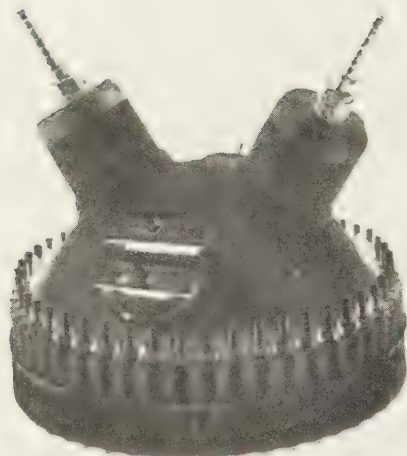


Figure 3

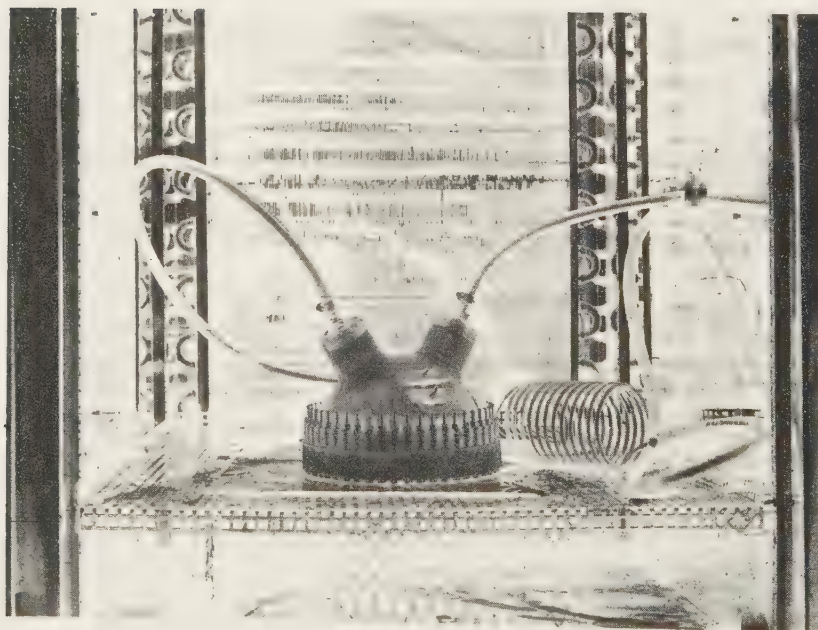
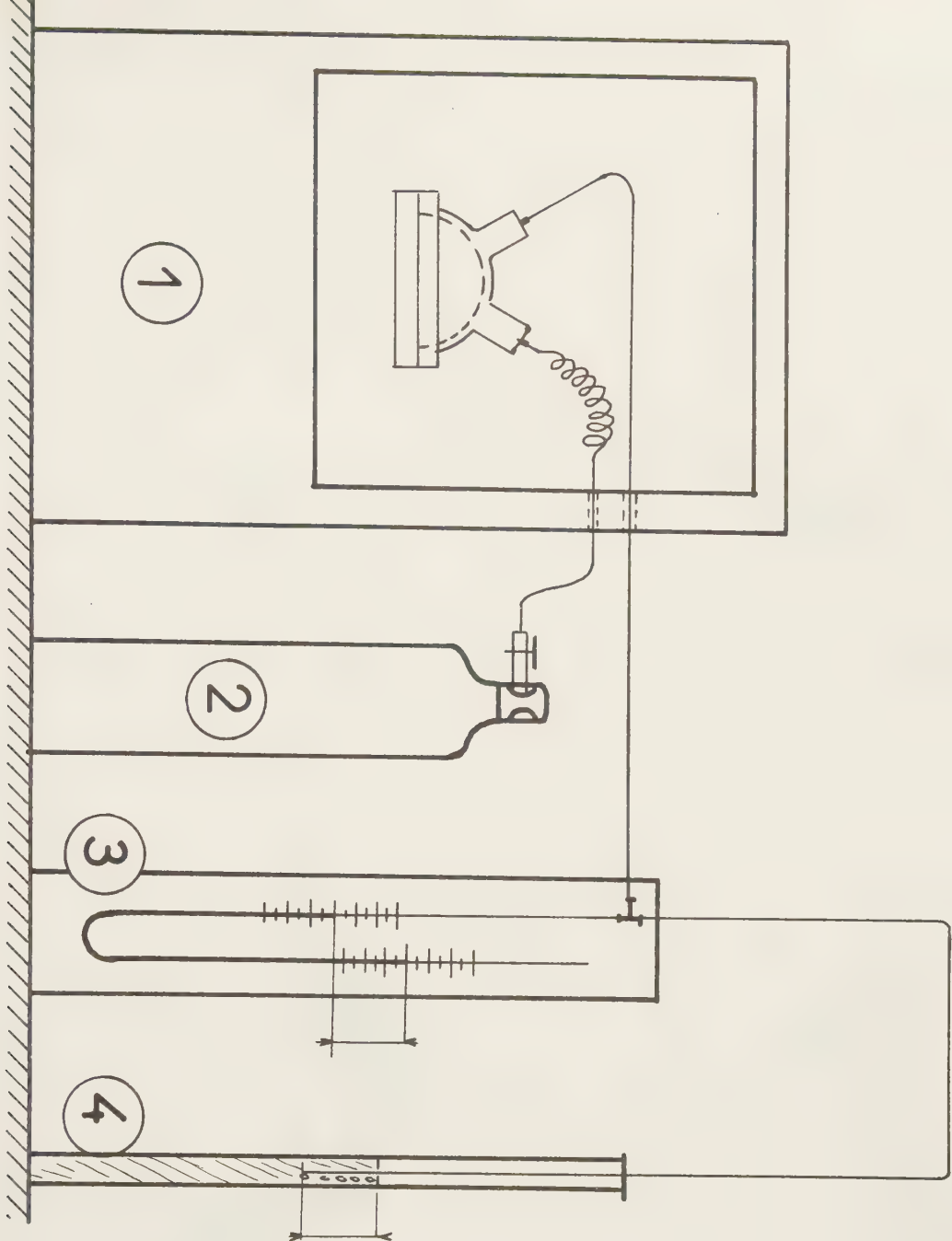
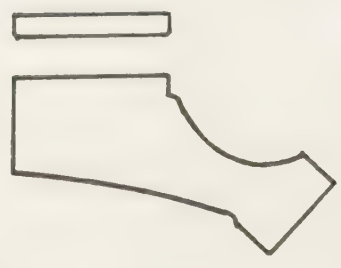


Figure 4



- 1 ÉTUVE
- 2 AIR COMPRIMÉ
- 3 MANOMÈTRE
- 4 SOUPAPE HYDRAULIQUE



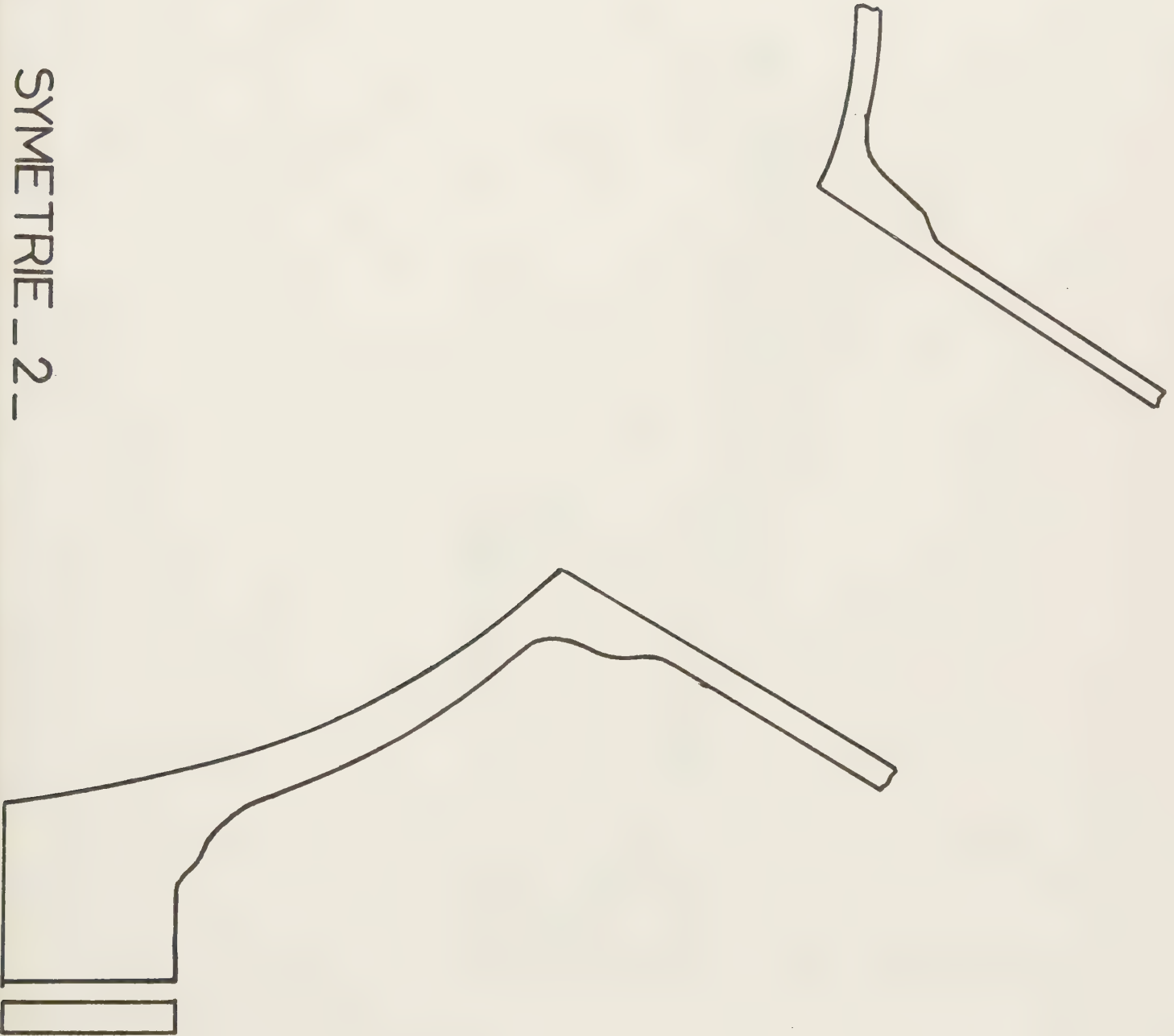


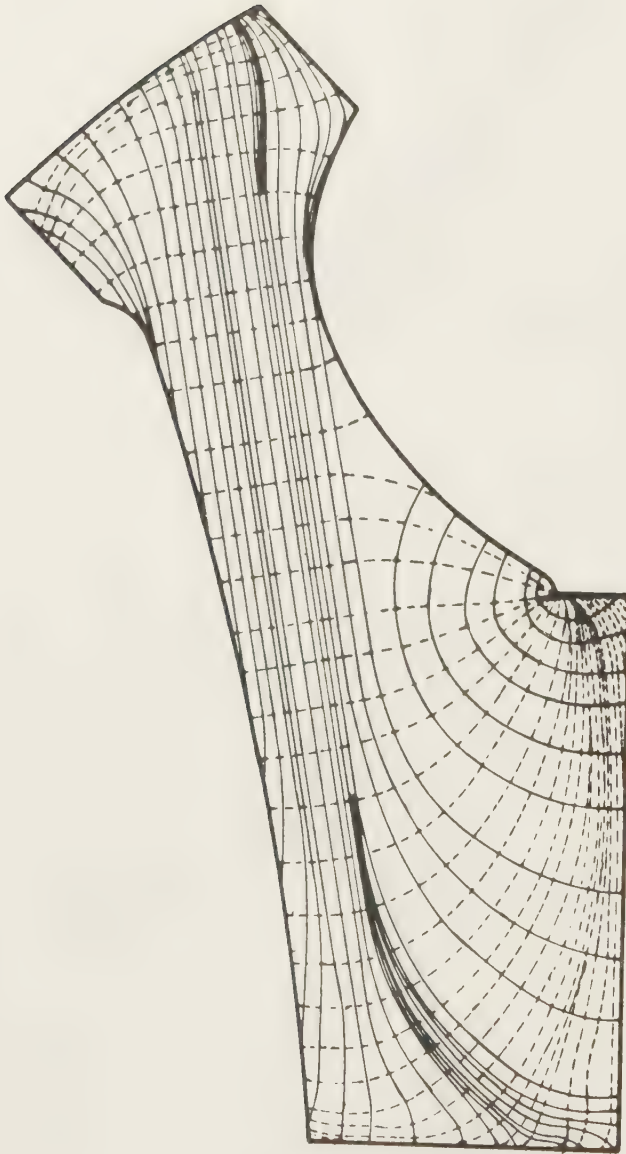
Isochromes dans le plan de symétrie 1



Isochromes dans le plan de symétrie 2

PLAN DE SYMETRIE - 2 -





Lignes techniques

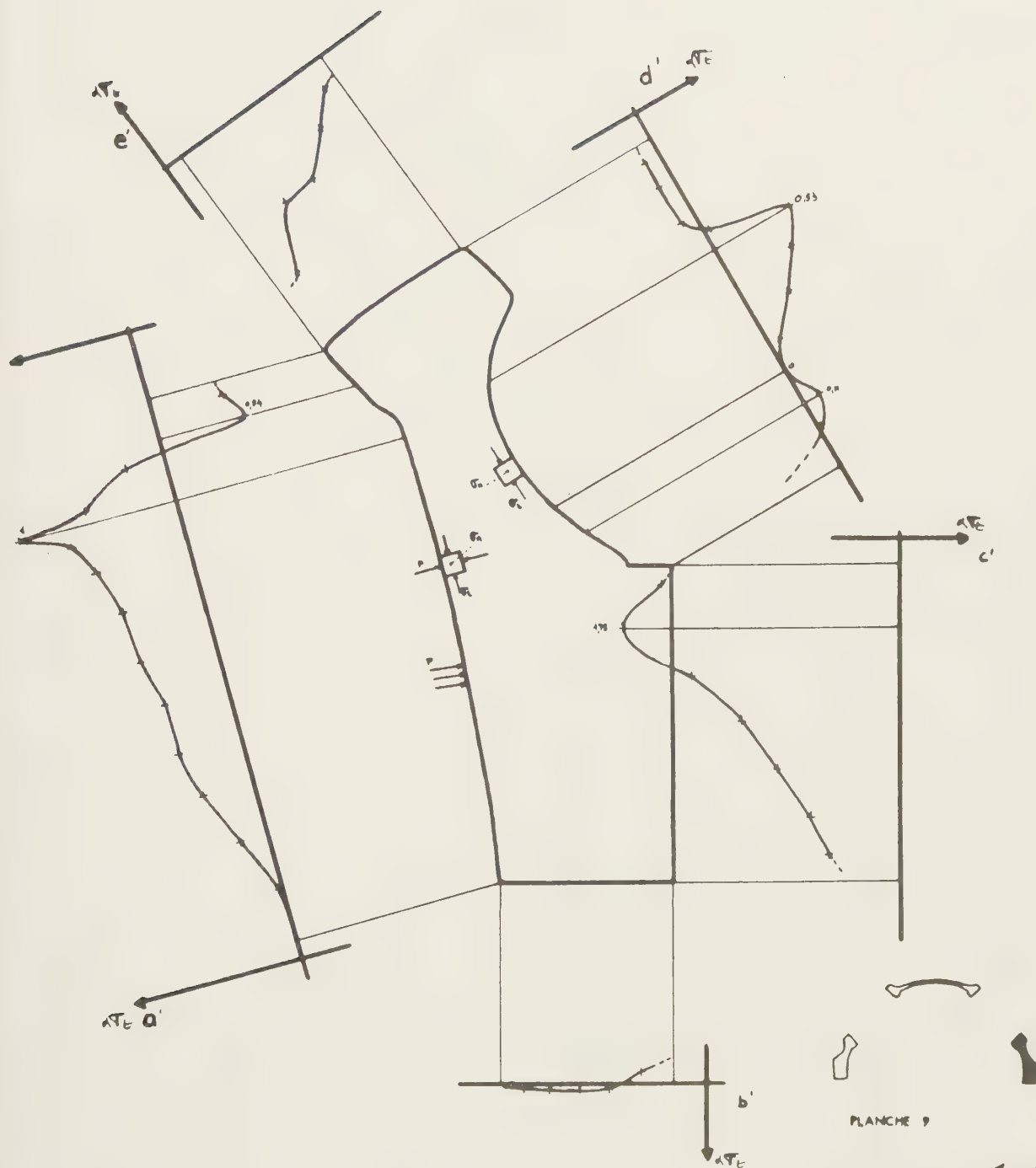
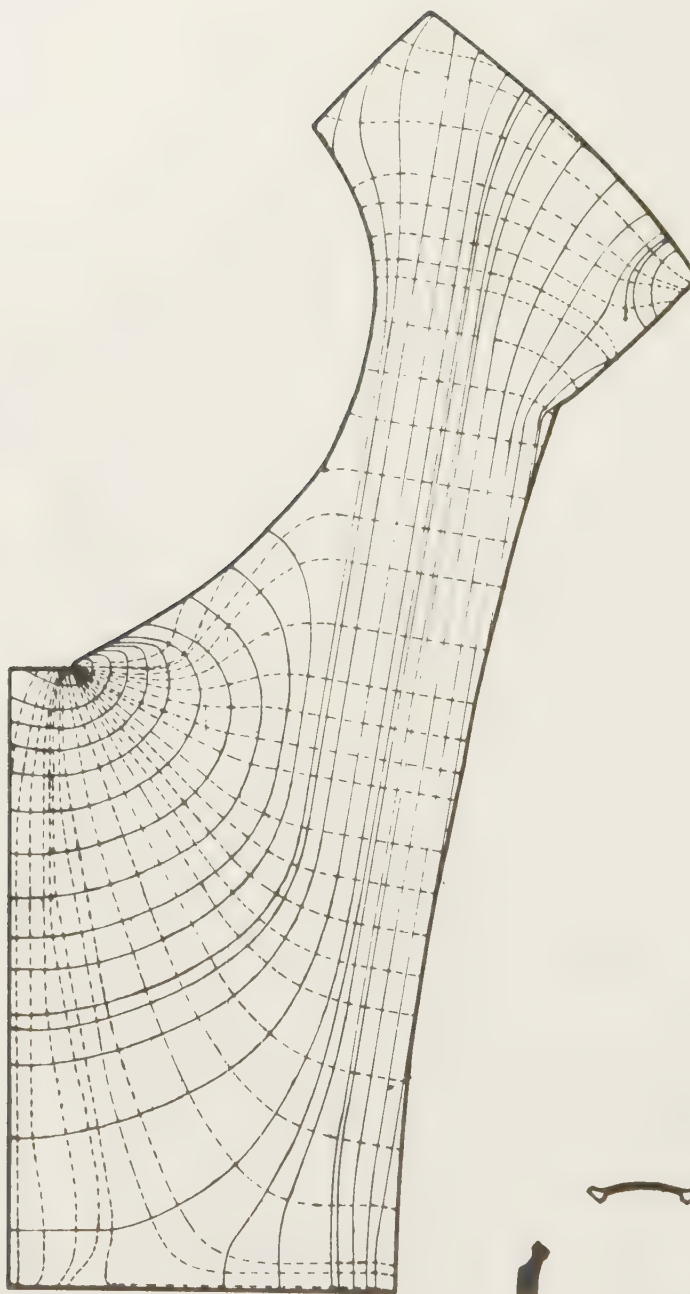
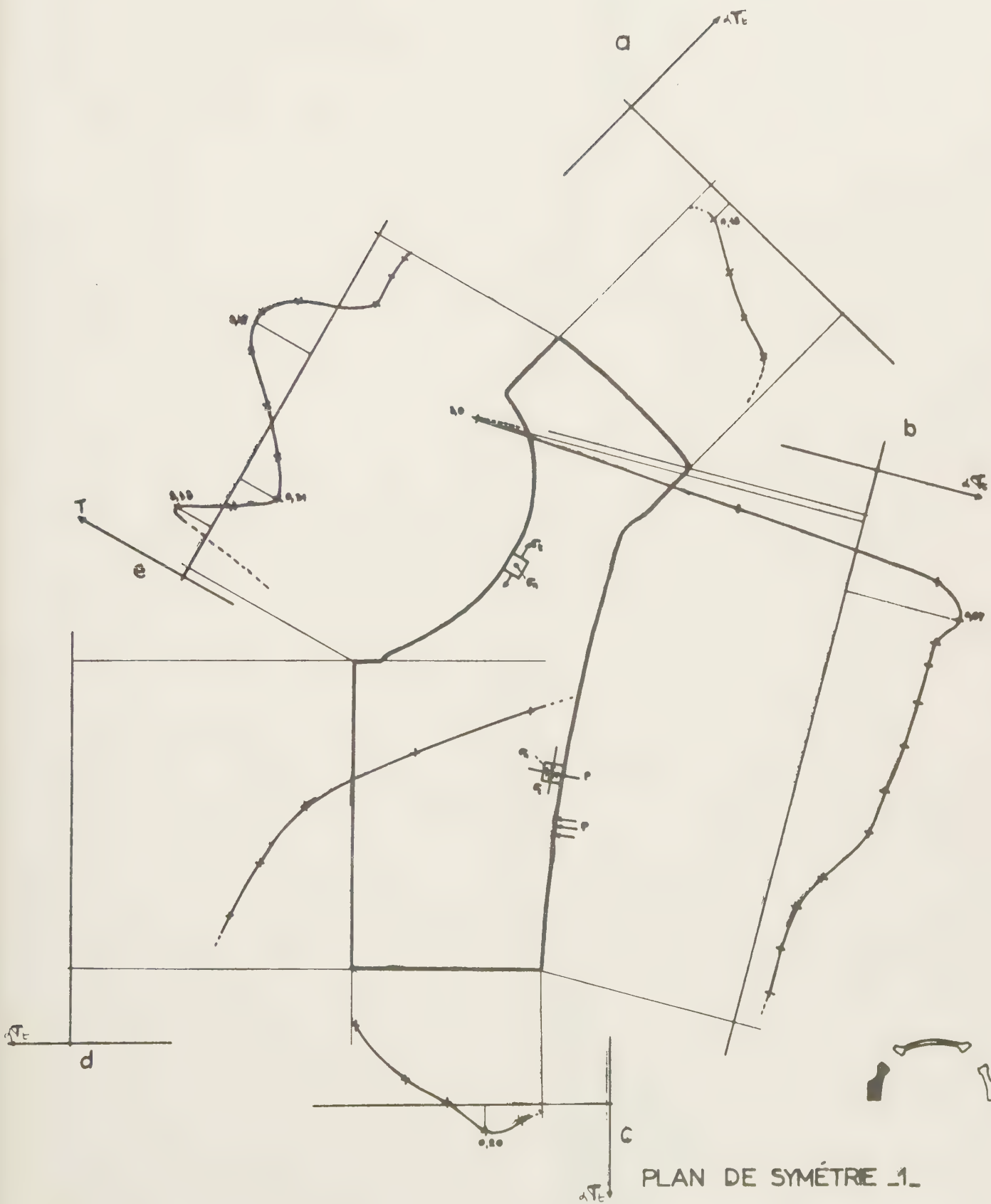


PLANCHE 9
PLAN DE SYMÉTRIE.1.



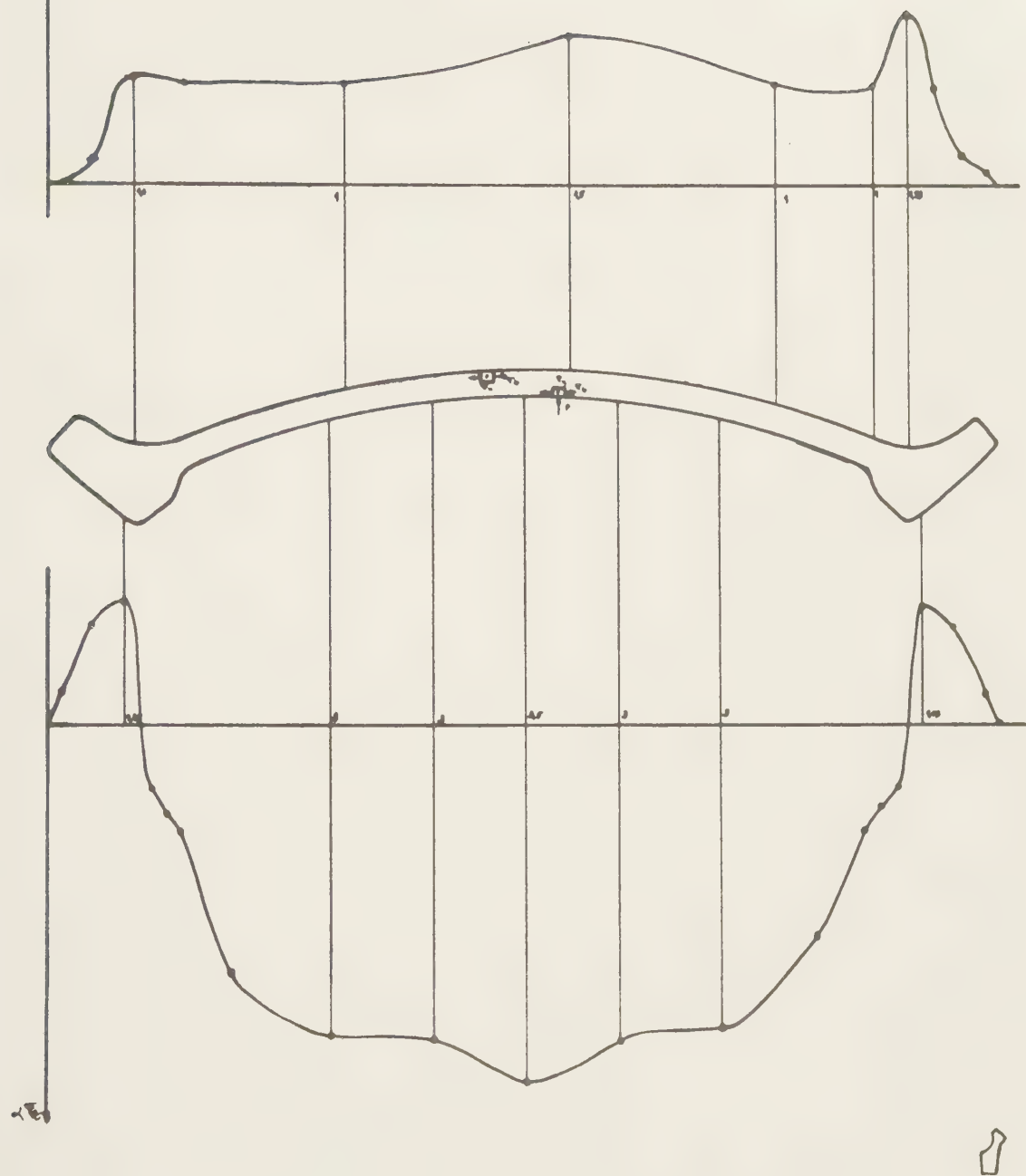
Lignes techniques



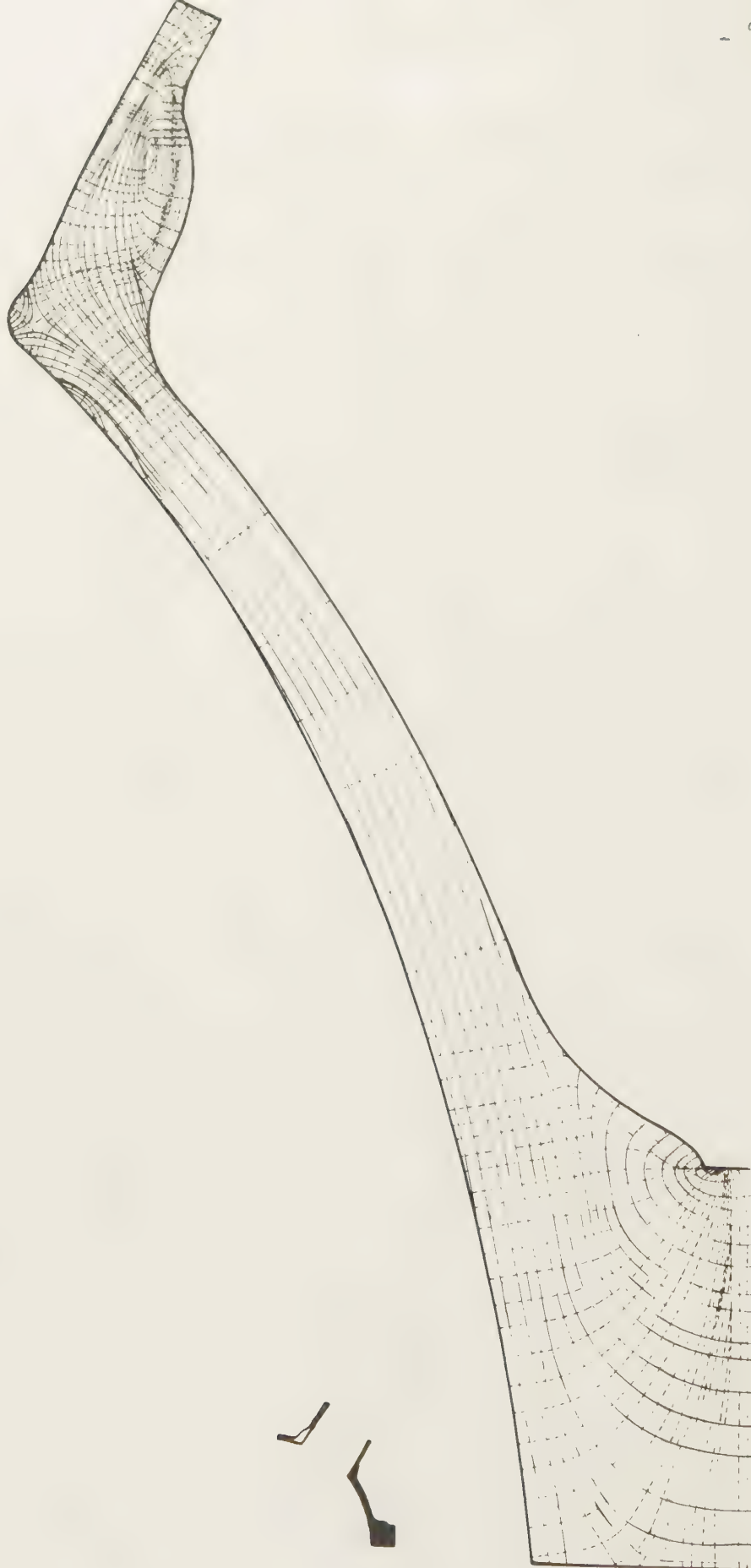


FLANGE 6

Upper flange



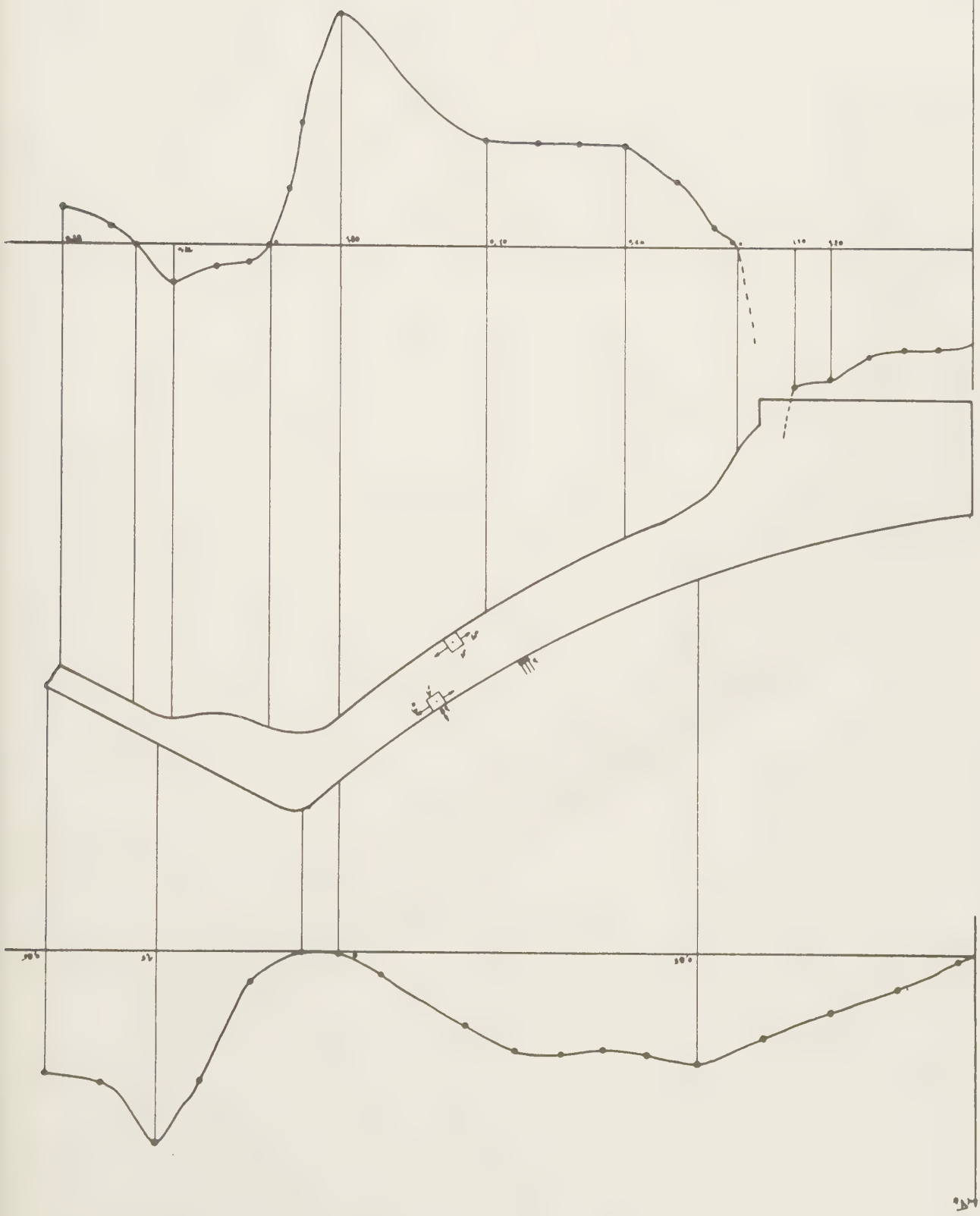
PLAN DE SYMÉTRIE .1-

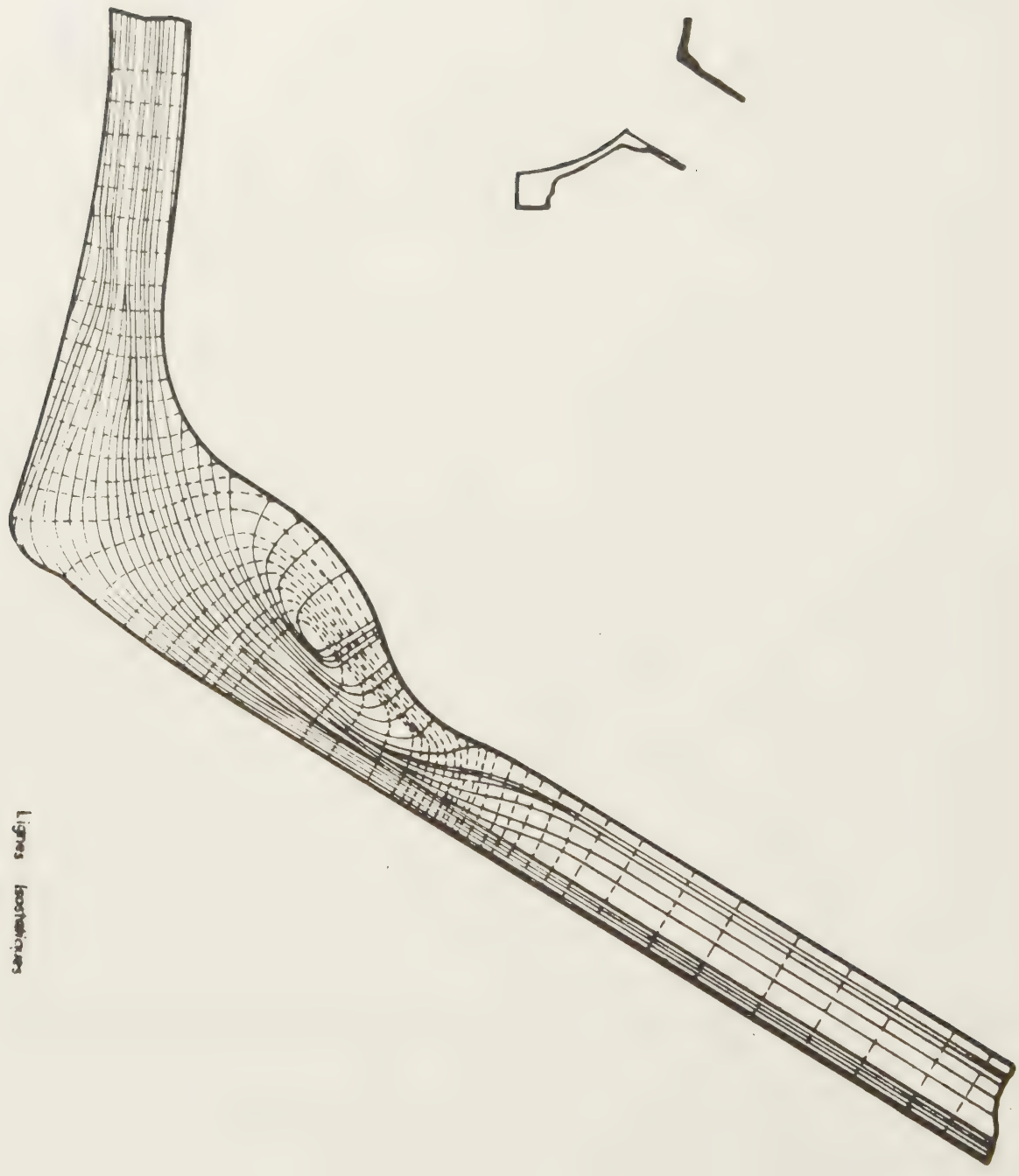


Lignes isostatiques

PLANCHE 13

PLAN DE SYMÉTRIE - 2 -





Lignes isochroniques

A.

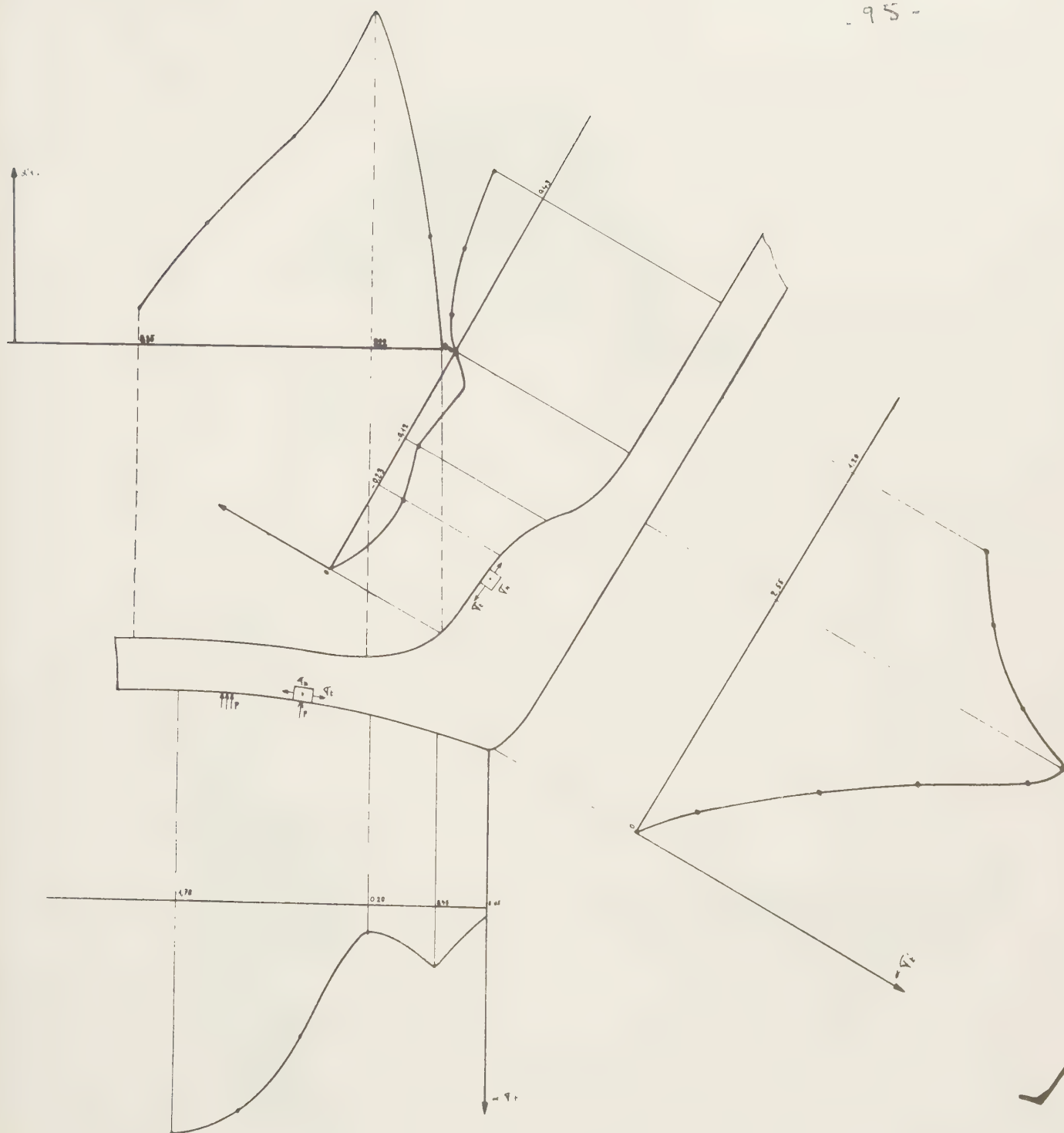
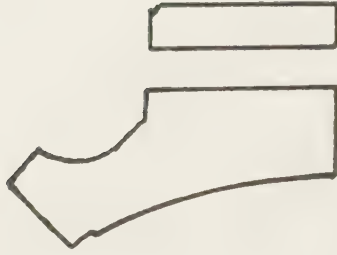
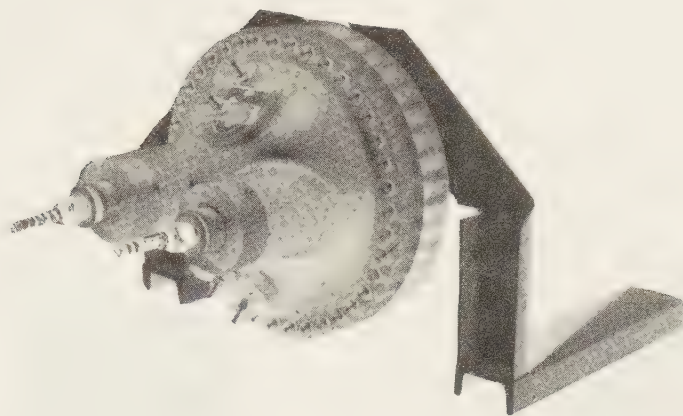


PLANCHE 12

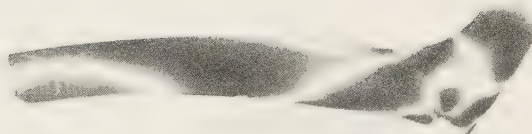
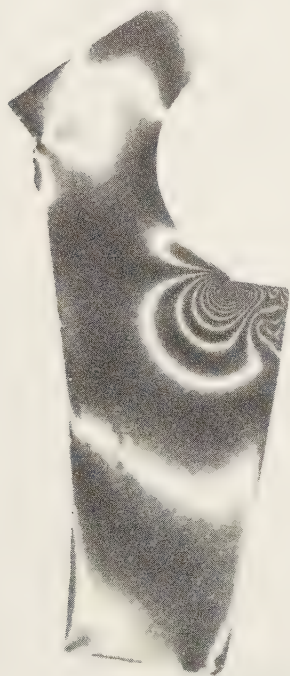
- PLAN DE SYMÉTRIE - 2 -

_ PLAN DE SYMÉTRIE 1A _





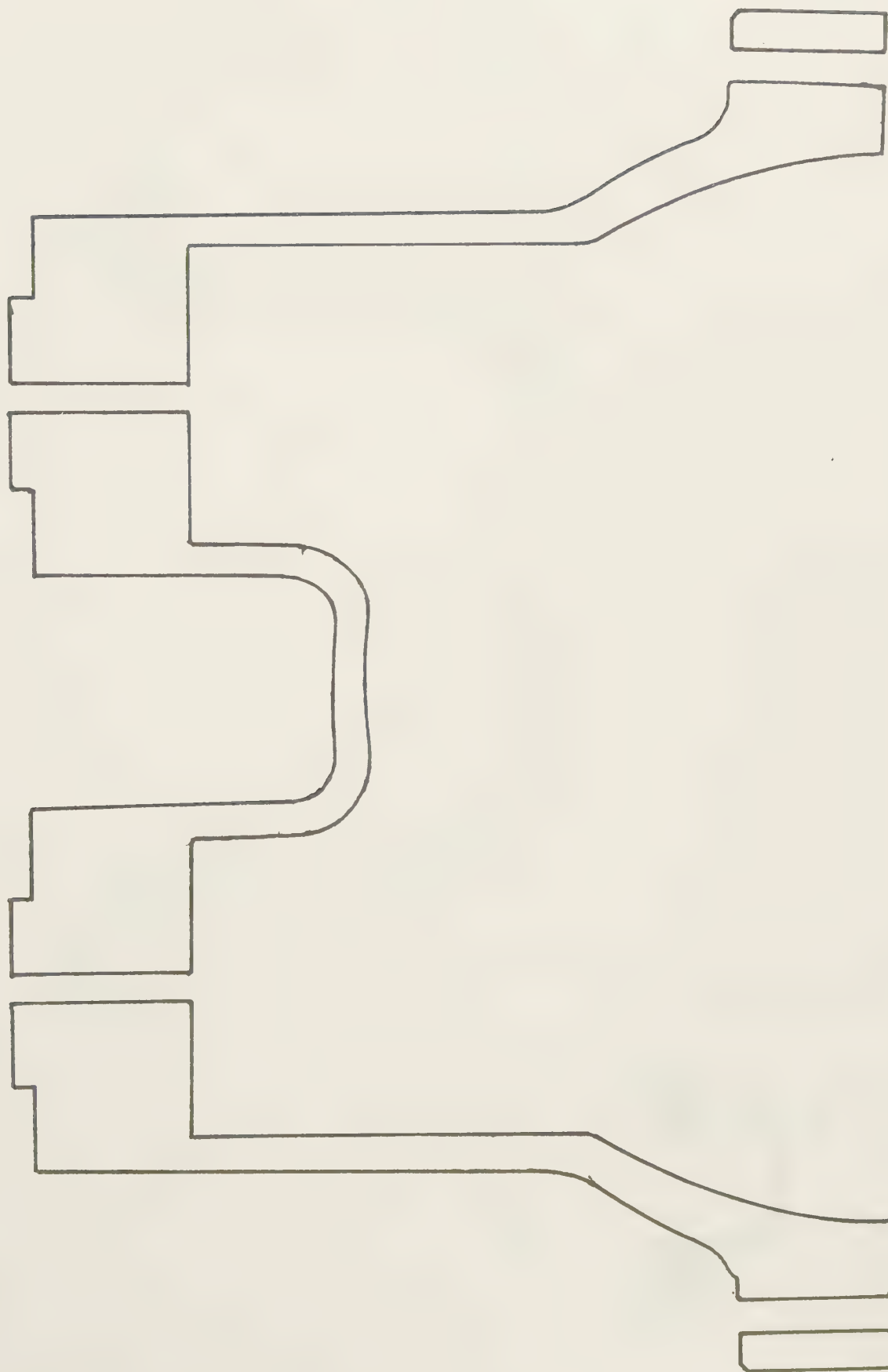
Maquette d'une coquille de condenseur à tubulures radiales

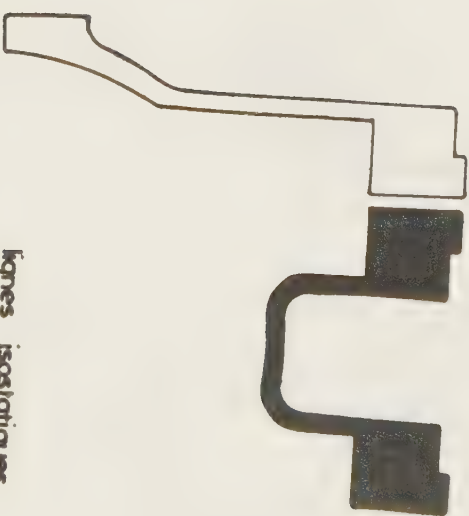
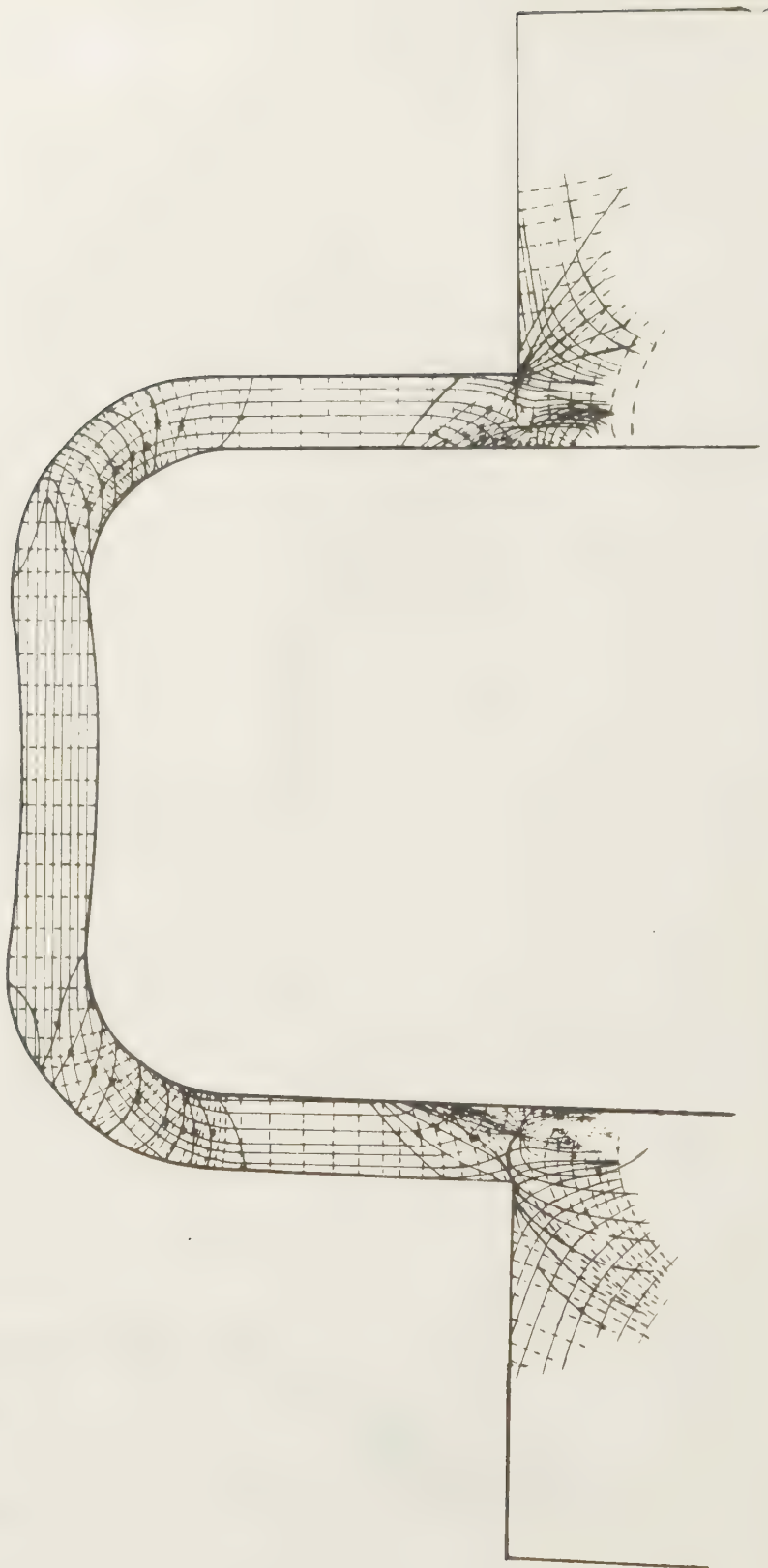


Isochromes dans le plan de symétrie 1A

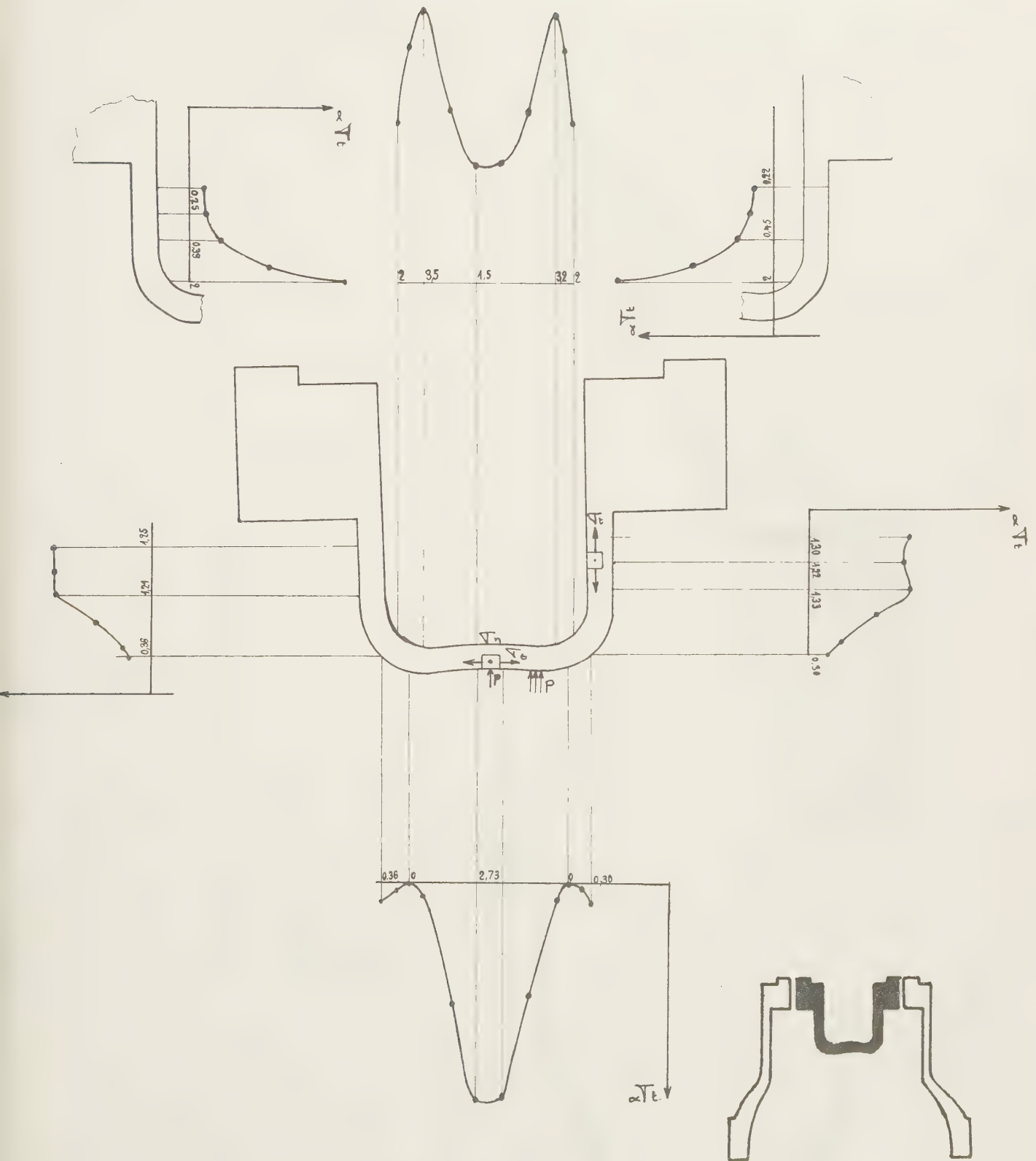


Isochromes dans le plan de symétrie 2A

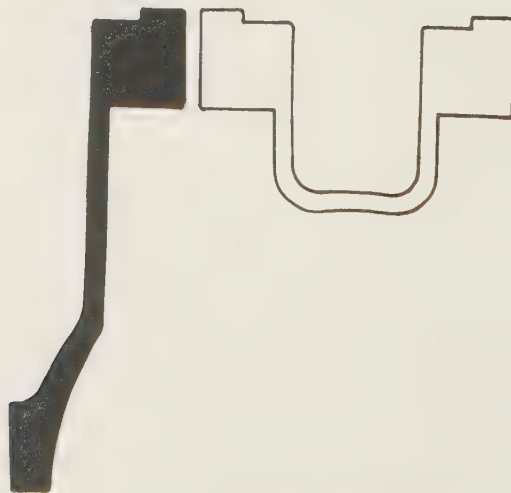
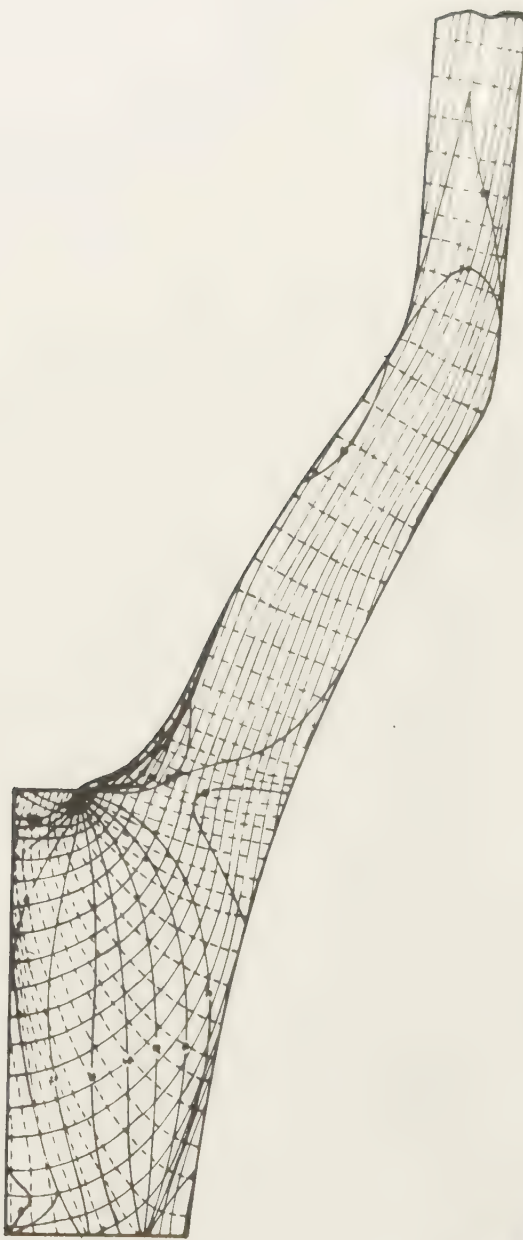




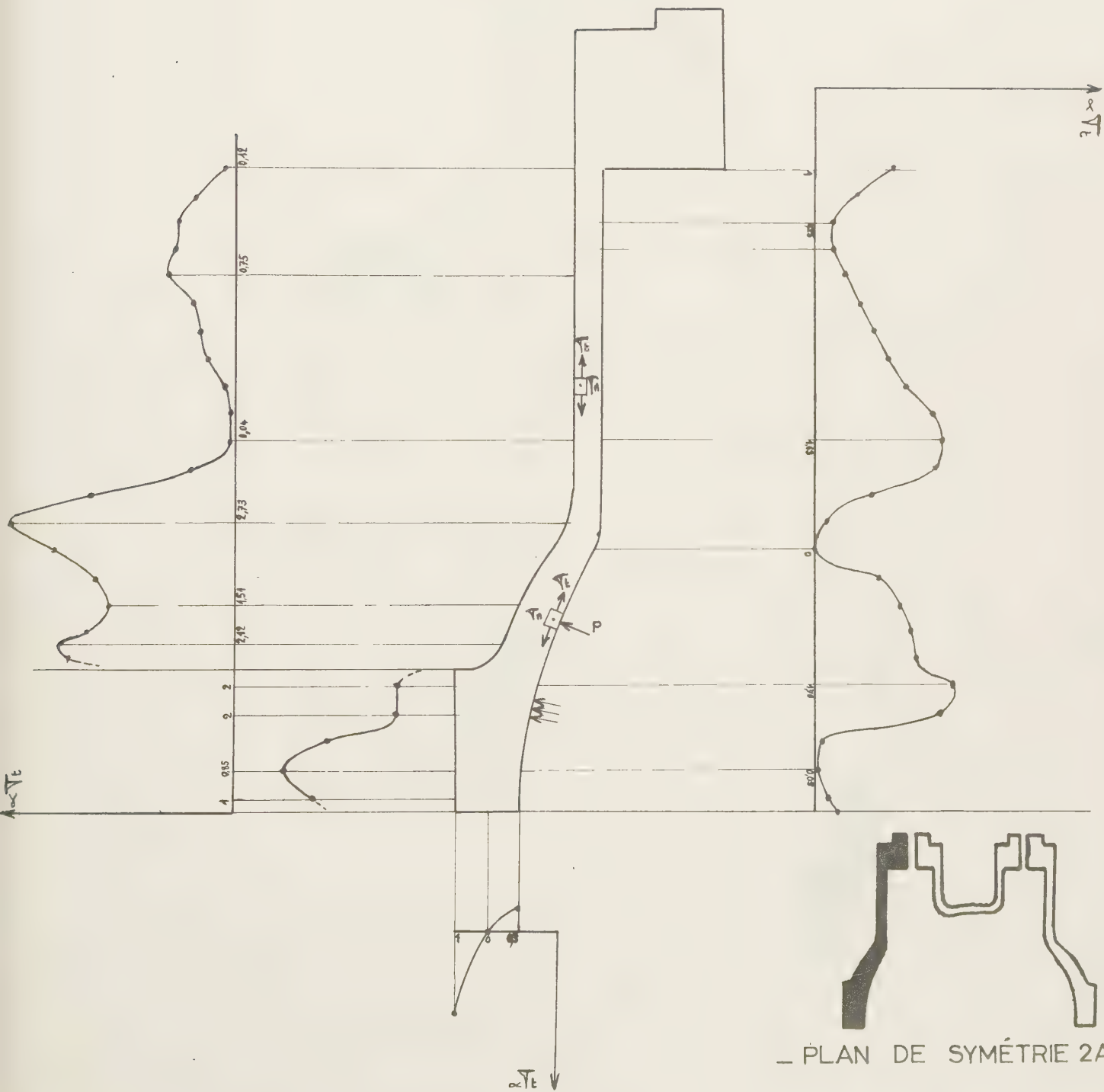
lignes isométriques



- PLAN DE SYMÉTRIE 2A -



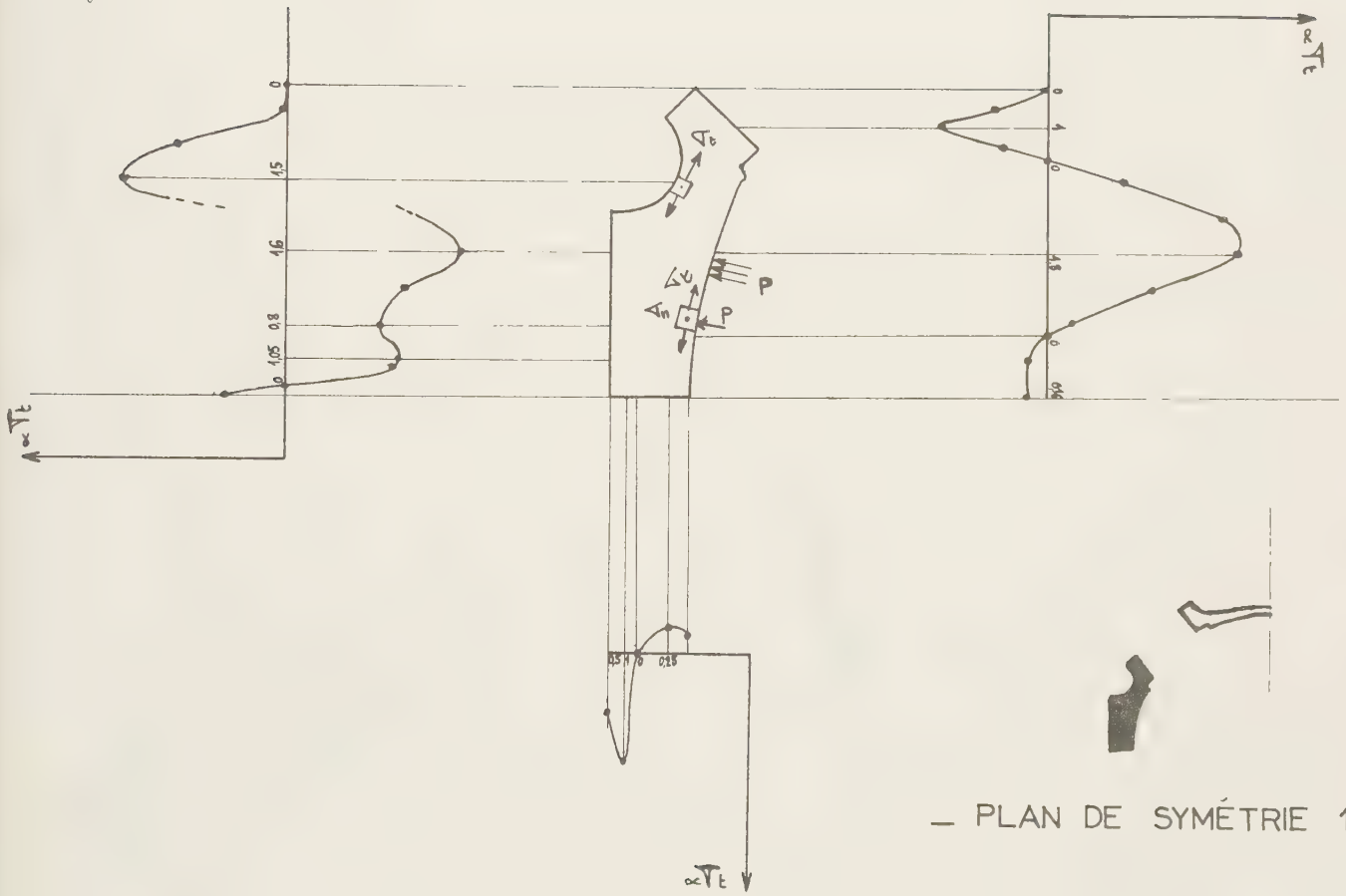
lignes isostatiques





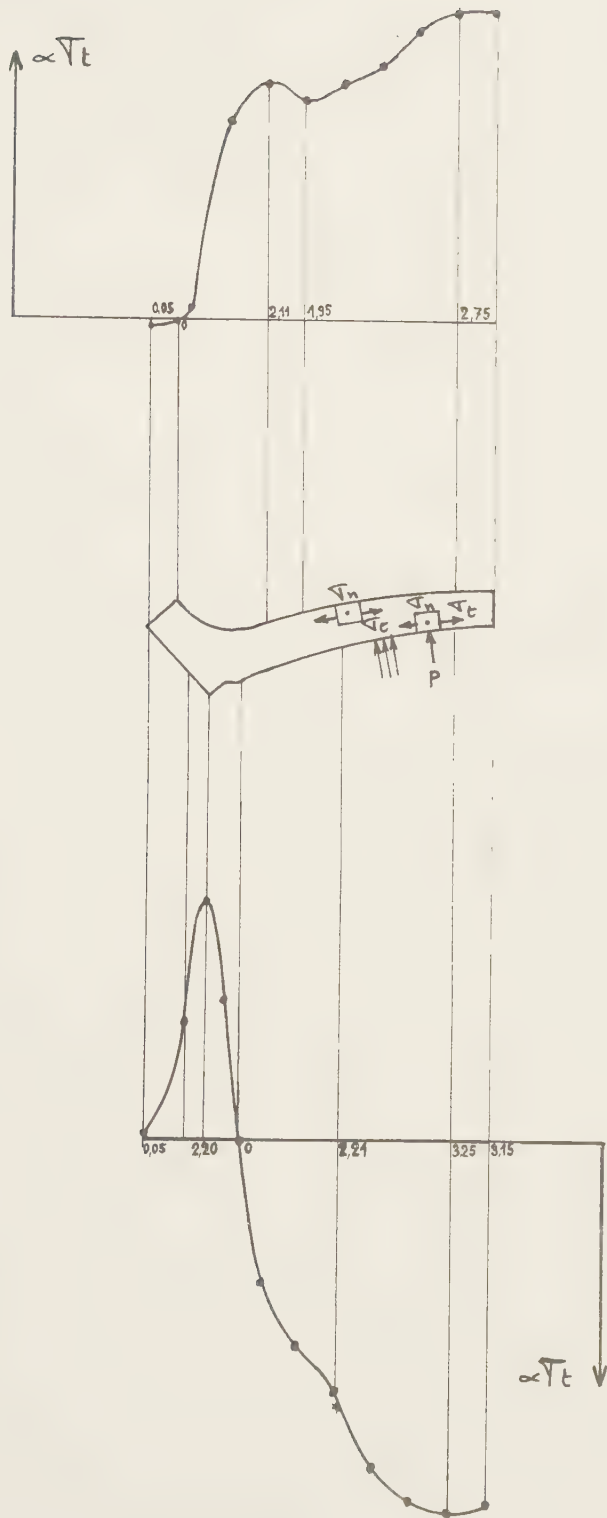
lignes isostatiques

— PLANCHE 17 —





lignes isostatiques



_ PLAN DE SYMÉTRIE 1A _

Deuxième Thèse

Propositions données par la Faculté

ETUDE SUR LE FLUAGE

VU

Le Directeur de Thèse

D. TARDY

VU et APPROUVE

Nantes, le 22 mai 1968

Le Doyen de la Faculté des Sciences

J.M. DUNOYER de SEGONZAC

VU

Le Président du Jury

D. TARDY

